

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA  
FAKULTA METALURGIE A MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ  
KATEDRA MATERIÁLŮ A TECHNOLOGIÍ PRO AUTOMOBILY

**OVĚŘENÍ PARAMETRŮ SVAROVÝCH SPOJŮ VYTVOŘENÝCH  
TECHNOLOGIÍ S NÍZKÝM VNESENÝM TEPLEM**

**VALIDATION OF WELDED JOINT PARAMETERS CREATED BY LOW HEAT  
INPUT TECHNOLOGY**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

AUTOR PRÁCE:

DAVID HLAVATÝ

VEDOUCÍ PRÁCE:

Ing. KATEŘINA RYCHLÁ, Ph.D

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství  
Katedra materiálů a technologií pro automobily

## **Zadání bakalářské práce**

Student: **David Hlavatý**

Studijní program: **B3923 Materiálové inženýrství**

Studijní obor: **3911R034 Materiály a technologie pro automobilový průmysl**

Téma: **Ověření parametrů svarových spojů vytvořených technologií s nízkým  
vneseným teplem  
Validation of welded joint parameters created by low heat input  
technology**

Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

1. Shrnutí současného stavu
2. Návrh experimentálního programu zkoušek svarových spojů
3. Provedení zkoušek svarových spojů
4. Vyhodnocení naměřených výsledků

Seznam doporučené odborné literatury:

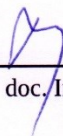
- [1] Kolektiv autorů, Technologie svařování a zařízení, ZEROSS - svářečské nakladatelství, Ostrava: srpen 2001, ISBN 80-85771-81-0.
- [2] KOUKAL J., SCHWARZ D., HAJDÍK J. Materiály a jejich svařitelnost. 1. vyd. Ostrava: Český svářečský ústav s.r.o, 2009. 240 s. ISBN 978-80-248-2025-5.
- [3] GEARY D., MILLER R. Welding. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, c2011. xvi, 328 s. ISBN 978-0-07-176387-5.
- [4] ROUČKA J. Metalurgie neželezných slitin. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. 148 s. ISBN 80-214-2790-6.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

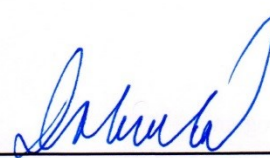
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Kateřina Rychlá, Ph.D.**

Datum zadání: 30.11.2017

Datum odevzdání: 30.04.2018

  
doc. Ing. Petr Tomčík, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.  
děkanka fakulty

# **Zásady pro vypracování bakalářské práce**

## **I.**

Bakalářskou prací (dále jen BP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

## **II.**

### Uspořádání bakalářské práce:

- |  |                              |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list                              | 6. Obsah BP                  |
| 2. Originál zadání BP                        | 7. Textová část BP           |
| 3. Zásady pro vypracování BP                 | 8. Seznam použité literatury |
| 4. Prohlášení + místopřísežné prohlášení     | 9. Přílohy                   |
| 5. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky |                              |

ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry.

ad 2) Originál zadání BP obdrží student na oborové katedře.

ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování bakalářské práce“ následují za originálem zadání BP. („Zásady pro vypracování bakalářské práce“ jsou ke stažení na webových stránkách fakulty).

ad 4) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listu (ke stažení na webových stránkách fakulty) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání BP. V případě, že BP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnícké nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním BP.

ad 5) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 6) Obsah BP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech číslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části BP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 7) Textová část BP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním BP;
- Vlastní rozpracování BP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků BP z hlediska stanoveného zadání.

BP bude zpracována v rozsahu min. 25 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury).

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující **doporučené** úpravy - písmo Times New Roman 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 9).

Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. Matematické vzorce musí být číslovány (v kulatých závorkách). U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury. Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

- ad 8) BP bude obsahovat alespoň 10 literárních odkazů, z toho nejméně 3 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. **Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690.** Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu BP.

- ad 9) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části, např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

### III.

Bakalářskou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahore: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*  
*Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství*  
*Katedra . . . . .*

uprostřed: *BAKALÁŘSKÁ PRÁCE*

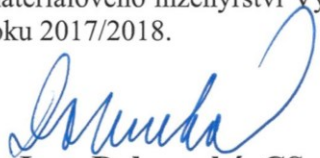
dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě. Po vložení BP do IS EDISON bude provedena její kontrola na plagiátorství.

### IV.

Nesplnění výše uvedených zásad pro vypracování bakalářské práce může být důvodem nepřijetí práce k obhajobě. O nepřijetí práce k obhajobě rozhoduje v tomto případě garant příslušného studijního oboru. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem bakalářského studia fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2017/2018.

Ostrava 13. 11. 2017

  
**Prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.**  
děkanka fakulty metalurgie a materiálového inženýrství  
VŠB-TU Ostrava



# PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 - školní dílo);
- беру на vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB - TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo - bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- беру на vědomí, že odevzdáním své bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

**Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracoval(a) samostatně.**

V Ostravě .....

30.4.2018

.....  
David Hladký  
.....  
podpis (jméno a příjmení studenta)

## ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá ověřováním parametrů svarových spojů, vytvořených technologií s nízkým vneseným teplem. Pro experiment byly vybrány tři hliníkové materiály. Následně byly zvoleny svařovací parametry a provedeny svarové spoje. Na základě výsledků nedestruktivních a destruktivních zkoušek, bylo provedeno vyhodnocení parametrů svarových spojů. Teoretická část obsahuje problematiku svařování hliníku a jeho slitin, dále jednotlivé technologie svařování s nízkým vneseným teplem a teoretický popis zkoušek materiálů, kterými se ověřovali parametry svarových spojů. Experimentální část obsahuje jednotlivé materiály a zařízení, použité v experimentu. Práce pokračuje návrhem experimentu a následnými zkouškami zkušebních vzorků. Na závěr je provedeno vyhodnocení výsledků.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Svařování, MIG, hliník, vnesené teplo, SpeedPulse.

## ABSTRACT

The bachelor thesis deals with verification of welded joint parameters created by low heat input technology. Three aluminum materials were selected for the experiment. Welding parameters were then selected and welded joints were made. Based on the results of non-destructive and destructive tests, the parameters of the weld joints were evaluated. The theoretical part deals with welding of aluminum and its alloys, low heat input welding technologies and the theoretical description of material tests, to verify the welding joint parameters. The experimental part contains the individual materials and equipment used in the experiment. Thesis continues with the experiment and subsequent testing of the test samples. In conclusion the results are evaluated.

## KEY WORDS

Welding, MIG, aluminum, heat input, SpeedPulse.

## PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval vedoucí bakalářské práce paní Ing. Kateřině Rychlé, Ph.D., za příkladné vedení, ochotu a trpělivost při konzultacích a za její cenné připomínky, které napomohly k zhotovení této práce.



## Obsah

Úvod .....	- 11 -
1 SOUČASNÝ STAV .....	- 12 -
1.1 Svařitelnost hliníku .....	- 12 -
1.2 Svařování hliníku a hliníkových slitin metodou MIG (Metal Inert Gas) .....	- 14 -
1.2.1 Přenos kovu .....	- 15 -
1.2.2 Základní parametry svařování .....	- 17 -
1.2.3 Tepelný příkon.....	- 17 -
1.3 Technologie svařování s nízkým vneseným teplem .....	- 17 -
1.3.1 Technologie SpeedPulse.....	- 18 -
1.3.2 Technologie SpeedCold.....	- 18 -
1.3.3 Technologie SpeedArc .....	- 19 -
1.3.4 Technologie SpeedUp.....	- 19 -
1.3.5 Technologie SpeedRoot.....	- 20 -
1.3.6 Technologie Speed-TwinPuls.....	- 20 -
1.3.7 Technologie CMT .....	- 21 -
2 ZKOUŠKY MATERIÁLŮ A SVÁROVÝCH SPOJŮ .....	- 22 -
2.1 Vizuální zkouška.....	- 22 -
2.2 Kapilární zkouška .....	- 22 -
2.3 Zkouška tahem.....	- 23 -
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	- 27 -
3.1 Obecný popis materiálů a zařízení použitých pro experiment.....	- 27 -
3.1.1 Vybrané hliníkové materiály pro experimentální část.....	- 27 -
3.1.2 Přídavný materiál OK AUTROD 5087 (AlMg4,5MnZr).....	- 29 -
3.1.3 Zařízení pro svařování metodou MIG .....	- 29 -
3.2 Postup experimentu.....	- 30 -

3.2.1	Příprava a úprava svarových ploch.....	- 30 -
3.2.2	Provedení tupých svarů se zvolenými svařovacími parametry .....	- 31 -
3.2.3	Návrh a provedení nedestruktivních zkoušek svarových spojů.....	- 32 -
3.2.4	Návrh a zhotovení zkušebních vzorků.....	- 38 -
3.2.5	Návrh a provedení destruktivní zkoušky svarových spojů.....	- 39 -
3.2.6	Zpracování výsledků.....	- 40 -
4	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ .....	- 45 -
	Závěr.....	- 48 -
	Seznam použité literatury .....	- 49 -
	Seznam obrázků.....	- 52 -
	Seznam tabulek.....	- 54 -
	Seznam grafů .....	- 54 -
	Přílohy .....	- 56 -

## Úvod

V současné době minimalizace, se konstruktéři v automobilovém průmyslu, snaží snižovat hmotnost konstrukcí dopravních prostředků s ohledem na jejich celkové zatížení, což ovlivňuje například jejich výkon a množství emisí. Z tohoto důvodu se často využívají hliníkové slitiny. Hliníkové slitiny díky zpevňovacím procesům a tepelnému zpracování dosahují vynikajících mechanických vlastností srovnatelných s oceli, ale zároveň si zachovávají svou nízkou hmotnost.

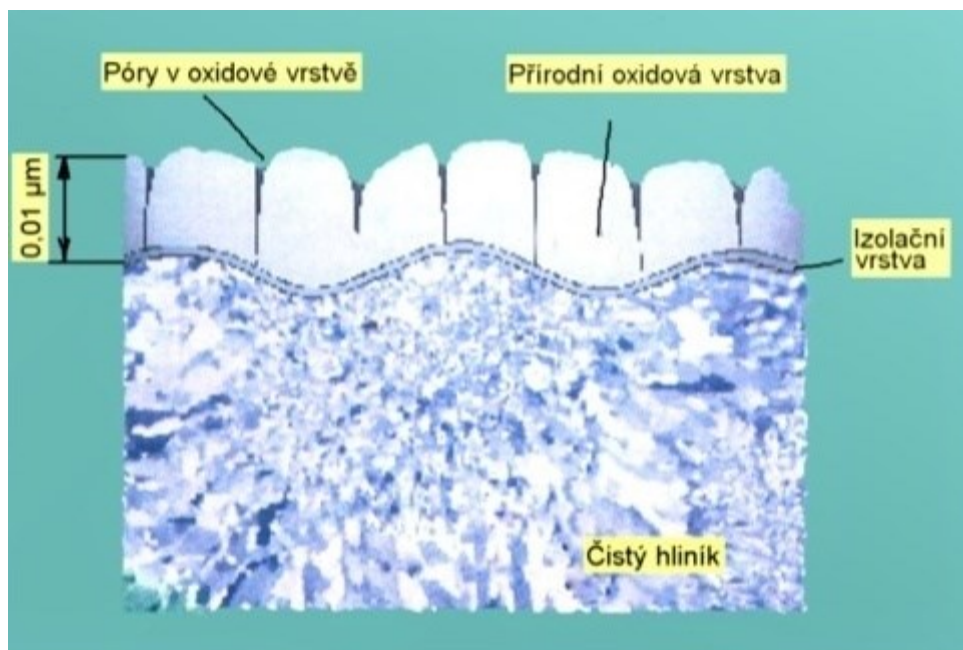
Cílem mé bakalářské práce je ověřit svařovací parametry svarových spojů vytvořených technologií s nízkým vneseným teplem. Při změně hlavních svařovacích parametrů, jako je proud, napětí, rychlost svařování, rychlost podávání drátu a průtok ochranného plynu, dochází ke změně kvality svaru a množství vneseného tepla. Při běžném svařování vstupuje do svařovaných materiálů vysoké množství tepla, a to má za následek tvorbu vnitřního pnutí, trhlin a deformací. Pro samotné ověření vhodných svařovacích parametrů, využiji nedestruktivní vizuální a kapilární zkoušku, a destruktivní zkoušku materiálu, konkrétně zkoušku tahem. Experiment provedu na hliníku a jeho slitinách, které byli vybrány na základě jejich mechanických vlastností, dobré svařitelnosti a dostupnosti, které budou následně použity při konstrukci prototypu vozidla např. battery boxu.

# 1 SOUČASNÝ STAV

Hliník a jeho slitiny jsou značně využívány, hlavně na konstrukce, v automobilovém a leteckém průmyslu, kvůli své korozivzdornosti, nízké hmotnosti a vysokému poměru pevnosti k hmotnosti. Při spojování tenkých plechů, musíme využívat metody, při kterých nevstupuje do materiálů příliš mnoho tepla. Mezi běžné způsoby spojování těchto materiálů, v dnešní době, patří metody tavného svařování, konkrétně technologií s nízkým vneseným teplem. S rostoucím vneseným teplem ve spojovaných materiálech, roste i rozsah jejich deformací. Množství vneseného tepla je ovlivňováno hlavně parametry svařování, které ovlivňují také kvalitu, produktivitu a cenu svarového spoje. Kvalita svarů podstatně ovlivňuje soudružnost celé konstrukce. Pro určení kvality a pevnostních charakteristik svarů jsou, i přes velký rozvoj a dostupnost nedestruktivních zkoušek svarových spojů, stále využívány zkoušky destruktivní.

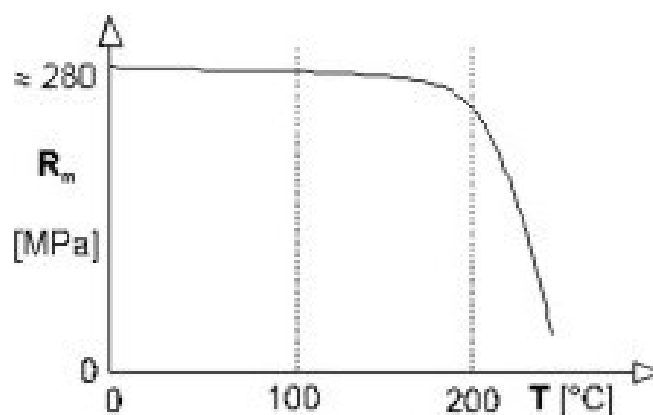
## 1.1 Svařitelnost hliníku

Svařitelnost hliníku je schopnost materiálu vytvořit pevný svarový spoj o určitých vlastnostech. Svařitelnost hliníku je ovlivňována několika negativními jevy. Hlavním jevem je velká afinita hliníku ke kyslíku, a následná tvorba tenké oxidické vrstvičky  $\text{Al}_2\text{O}_3$  na povrchu čistého hliníku a hliníkových slitin, jak můžeme vidět na obrázku číslo 1. Tato oxidická vrstva, jejíž tloušťka je asi  $0,01 \mu\text{m}$ , zajišťuje vysokou ochranu před další oxidací samotného hliníku, dále je přilnavá k povrchu a elektricky nevodivá. Má vyšší hustotu ( $3960 \text{ kg/m}^3$ ) i teplotu tavení ( $2250^\circ\text{C}$ ) než čistý hliník. Tento oxid hliníku je hydrofilní, váže na sebe vodu, která je zdrojem vodíku ve sváru. Vodík, který má velmi vysokou rozpustnost v hliníku s rostoucí teplotou, je zdrojem porozity.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dále zabraňuje spojení základního materiálu s přídatným materiálem, a proto se musí před samotným svařováním z povrchu svařovaných součástí odstranit. Z důvodu velké odolnosti této vrstvy je její odstranění z povrchu součástí značně obtížné, proto se běžné využívají různé čisticí prostředky jak chemické, nebo mechanické, tak i fyzikální. V praxi se pro chemické čištění využívají hlavně mořicí a oplachovací lázně, nebo různá tavidla. [1], [2], [3]



Obr. 1: Vrstva Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> na povrchu hliníku [4]

Dále hliník při zahřívání nemění svou barvu, což nám komplikuje sledování tavné lázně a určení bodu tavení. Mezi další problémy, při svařování hliníku, patří jeho vysoká tepelná vodivost, kdy musíme využít vyšších tepelných příkonů při svařování a jsou nutné i předehřevy, které jsou často velmi nákladné. Teploty předehřevu se pohybují kolem teploty 150°C, protože slitiny hliníku jsou citlivé na ohřev. Kvůli vysokému tepelnému koeficientu roztažnosti, mohou ve svařovém kovu vznikat trhliny za horka. Pro zabránění vzniku trhlin, se volí vhodná technologie svařování, aby se snížilo tepelné ovlivnění svařovaných materiálů. [1], [2], [3]



Obr. 2: Graf závislosti pevnosti materiálu na teplotě ohřevu [4]



Dalším problémem může být citlivost slitin hliníku na teplotu ohřevu. Při ohřevu vytvrditelných slitin hliníku vznikají v teplem ovlivněné oblasti zpevňovací procesy, které způsobují pokles mechanických vlastností a pokles korozivzdornosti. Podle obrázku číslo 2 je zřejmé, že za nižších teplot ohřevu než 200°C se nijak výrazně nemění pevnost slitin, ale ohřev nad teplotu 200°C způsobí výrazný pokles meze pevnosti a také meze kluzu. U některých slitin může docházet při svařování ke vzniku prasklin. [1], [2], [5]

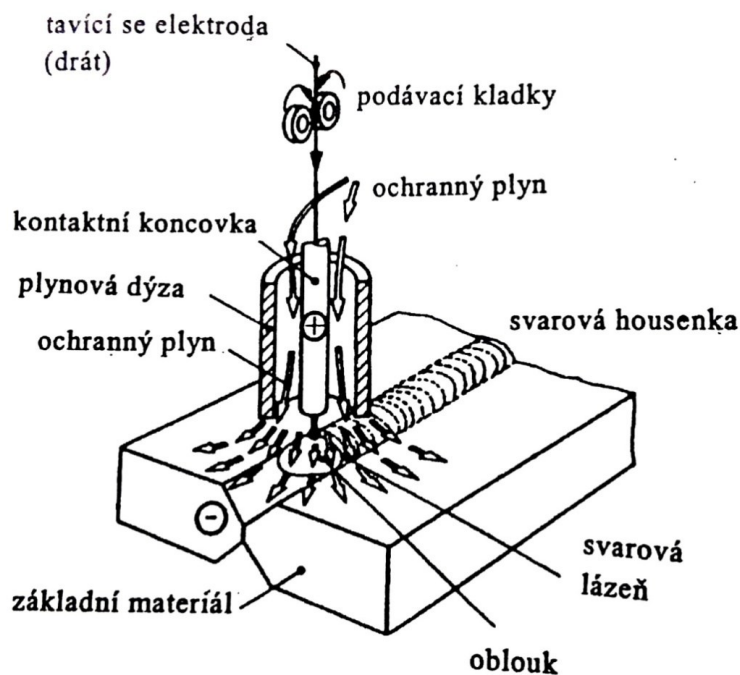
## **1.2 Svařování hliníku a hliníkových slitin metodou MIG (Metal Inert Gas)**

Svařitelnost hliníku a jeho slitiny přes problémy uvedené v kapitole 1.1 můžeme označit za dobrou. Hliník a slitiny hliníku můžeme svařovat různými běžně používanými metodami, například plamenem, nebo elektrickým obloukem, ale i speciálními metodami jako je odporové svařování, svařování tlakem, nebo třením. Pro svařování hliníku a hliníkových slitin se používá hlavně metoda svařování MIG a metoda netavící se elektrodou TIG.

Obloukové svařování tavící se elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu, je svařovací proces číslo 131, byl poprvé využit v USA v polovině čtyřicátých let. Od té doby, se tato metoda svařování používá v širokém spektru průmyslového odvětví, např. v automobilovém průmyslu.

Je to metoda obloukového svařování, při které se využívá kontinuálně dodávaný drát, navinutý na cívce, jako elektroda a zároveň jako přídavný materiál. Elektrický oblouk a svařová lázeň je chráněna ochrannou atmosférou inertního plynu (Ar, He). Princip je vidět na obrázku 3, na následující straně.

Mezi hlavní výhody patří vysoké rychlosti svařování, menší ohřívané oblasti než u metody svařování TIG, vynikající schopnost odstranění vrstvy oxidu hliníku během svařování a všestranné svařovací využití. [1], [2], [3]



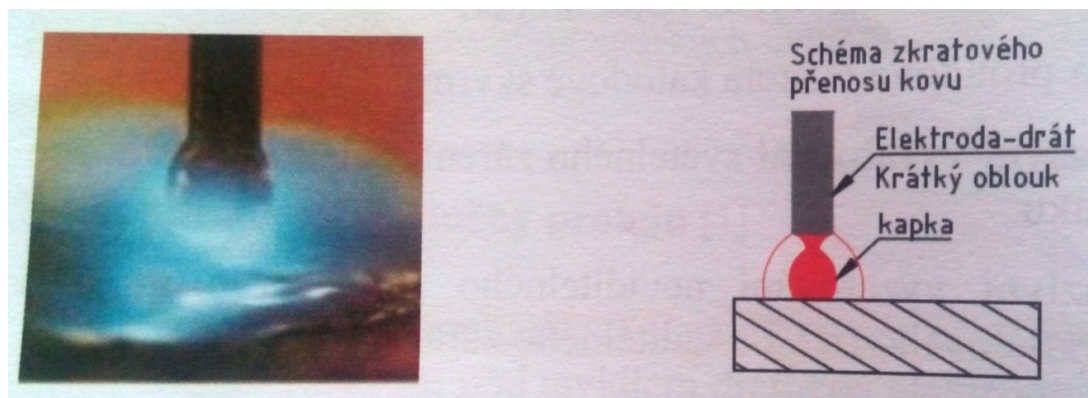
Obr. 3: Princip svařování obalenou elektrodou v inertním plynu MIG [2]

### 1.2.1 Přenos kovu

Přenos kovu v elektrickém oblouku závisí hlavně na svařovacích parametrech, volbě ochranného plynu, typu základního materiálu, na polaritě a případně i poloze svařování. Mezi základní druhy přenosu kovu podle normy ČSN EN ISO 4063 [19] patří:

#### 1) Zkratový přenos – D

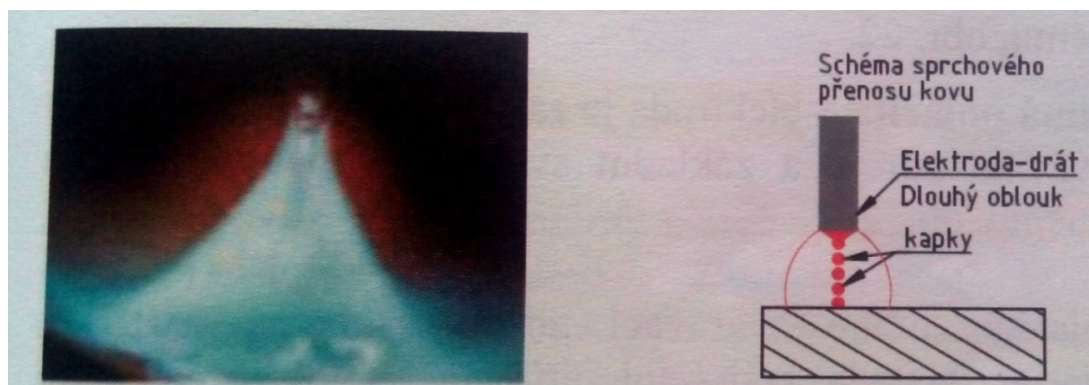
Je nejpoužívanější u metody MIG, je vhodný pro svařování tenkých plechů, kořenové části svaru nebo pro svařování v polohách. Tento přenos je doprovázen rozstříkáním kovu, což je jeho hlavní nevýhoda. Zkratový přenos kovu se uskutečňuje při nízkém napětí 14-23 V a proudu 60-180 A. [6], [7]



Obr. 4: Zkratový přenos kovu a jeho schéma [6]

## 2) Sprchový přenos – S

Tento přenos kovu je vhodný pro svařování hliníkových slitin metodou MIG, uskutečňuje se při napětí 30-40 V a vysokého proudu 200-500 A. Výhodou je, že nedochází k rozstříku kovu. Přenos se uskutečňuje formou malých kapek, viz obr. 5.



Obr. 5: Sprchový přenos kovu a jeho schéma [6]

Uplatňuje se při svařování metodou MIG hliníku a jeho slitin velkých tlouštěk. Dosahuje se při napětí 25–35 V a proudu 190–300 A. Kapka svarového kovu se nedotkne svarové lázně před oddělením od elektrody (oproti zkratovému přenosu) proto nevzniká zkrat. [6], [7]



Obr. 6: Impulzní a kapkový přenos kovu a jejich schéma [6]

## 3) Impulzní přenos – P

Používá se hlavně při svařování tenkých materiálů. Přenos kovu je velmi stabilní a téměř bez rozstříku a uskutečňuje ve formě kapek viz obr. 6. Přenos kovu probíhá při pulzujícím proudu, měnící se z nižšího (základní) na vyšší (impulzní), kde základní proud se pohybuje v rozsahu 5–50 A, impulzní 90–320 A, při napětí 24–35 V. Jde o kombinaci sprchového a kapkového přenosu kovu. [6], [7]

### 1.2.2 Základní parametry svařování

Před svařovacím procesem musíme nastavit parametry svařování, které nám ovlivňují celý proces. Parametry ovlivňují například rychlost svařování, stabilitu elektrického oblouku, čistotu svařované součásti, šířku housenky, hloubku závaru, aj. Kromě samotného svařovacího procesu, tyto parametry ovlivňují také konečné mechanické vlastnosti svařovaného dílu.

Mezi základní parametry svařovacího procesu patří svařovací proud  $I$ , svařovací napětí  $U$ , rychlost podávání svařovacího drátu  $v$ , rychlost svařování  $v_{sv}$  a složení ochranného plynu a jeho průtok. [1], [8]

### 1.2.3 Tepelný příkon

Termín "vstup tepla" se používá k popisu toho, kolik tepla je dodáno do materiálu během tavného svařování. Pro výpočet tepelného příkonu se používá následující vzorec:

$$Q = \frac{U \cdot I}{V \cdot 1000} \text{ kJ/mm [9]}$$

kde:

- $U$  – napětí
- $I$  – proud
- $V$  – rychlost svařování (mm/min)

Důvodem, proč je důležité vědět, jaký tepelný příkon se používá při svařování, je to, že měkké materiály, jako je hliník, jsou citlivější na vysoký přívod tepla, jenž může snížit mechanické vlastnosti svařovaného spoje. Proto je při svařování hliníku a jeho slitin výhodnější nízké množství vneseného tepla do svařovaných součástí, jak z hlediska pevnosti, tak houževnatosti. [9]

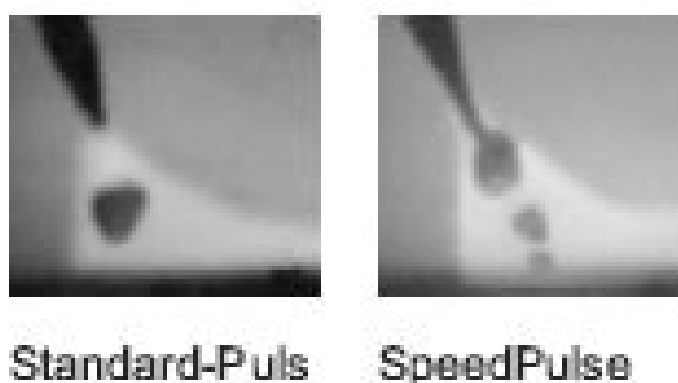
## 1.3 Technologie svařování s nízkým vneseným teplem

Už přes 30 let firma Lorch vyvíjí technologii pulzního svařování, jejichž kvalitu udržují stále na nejvyšší úrovni. Hlavním cílem jejich vývoje je co možná nejvíce zvýšit rychlost procesu, kvalitu svaru a co nejvíce omezit vnesené teplo do spojovaných materiálů.

V nejnovější sérii svařovacích zdrojů, S-SpeedPulse od firmy Lorch, patřící mezi nejlepší na světě, lze nalézt několik inovativních procesů. [10]

### 1.3.1 Technologie SpeedPulse

Technologie nám zabezpečí až o 48 % rychlejší svařování, hlubší a pevnější svar díky čemuž je práce produktivnější oproti jiným svařovacím zařízením. Podstata zrychlení procesu je schopnost zvýšit výkon tavení přídavného materiálu. Pulzní přenos kovu, vždy znamenal přenos jen jedné kapky, technologie SpeedPulse umožňuje kontrolovaný a skoro plynulý přenos materiálu do tavné lázně. Za první pulzovanou kapkou následuje druhý, regulovaný přenos materiálu podobný sprchovému oblouku viz obr. 7. Hlavní výhodou této technologie je hlubší a pevnější svar, celkově tišší proces, téměř bez rozstříku a je chladnější oproti jiným metodám MIG-MAG. [10], [11]

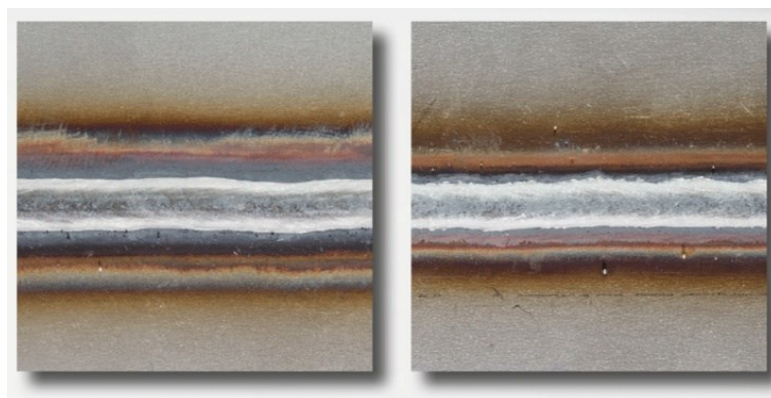


Obr. 7: Přenos materiálu standardní pulz (vlevo) a téměř plynulý přenos materiálu SpeedPulse (vpravo) [10]

### 1.3.2 Technologie SpeedCold.

Technologie SpeedCold nám zabezpečuje stabilní chování elektrického oblouku, minimální teplem ovlivněnou oblast a vynikající vzhled svaru, viz obr.8, při svařování tenkých plechů i o tloušťce 0,5 mm, a zároveň zabraňuje velkému a ulpívajícímu rozstříku. Celý proces je doprovázen minimálním vneseným teplem, proto je svařování s technologií SpeedCold s minimální víceprací, díky menšímu rozstříku a deformacím svařovaných součástí a nízké vnesené energii. Technologie SpeedCold vydává jen tolik energie, kolik je potřebné v dané části procesu, tím je celkové vnesené teplo o 25 % nižší než u běžných metod svařování. Technologie svařování s nízkým vneseným teplem je vhodné pro svařování velmi tenkých plechů přeplátovanými, tupými a koutovými svary. [10], [11]

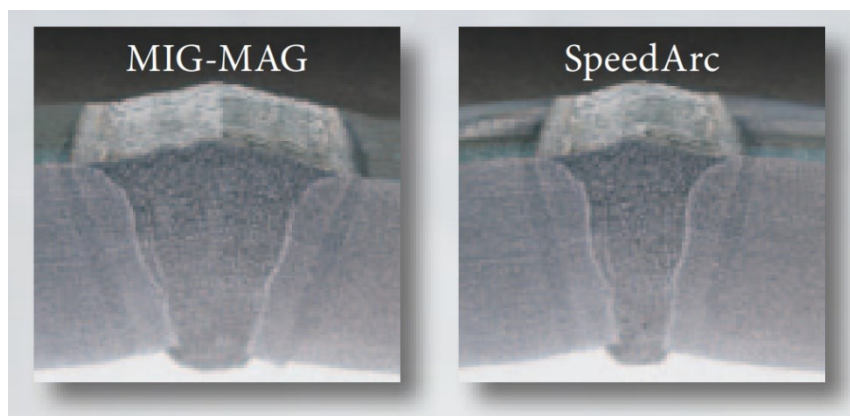




Obr. 8: Porovnání tupého svaru standardním krátkým obloukem (vlevo) a technologií s nízkým vneseným teplem SpeedCold (vpravo) [10]

### 1.3.3 Technologie SpeedArc

Tato technologie svařování je koncentrovanější, a díky vysoké hustotě energie, má elektrický oblouk vyšší tlak na tavnou lázeň, a tím je o 30 % rychlejší než běžné metody. Navíc dokáže spojit materiály v jedné vrstvě až 15 mm do hloubky. Dále technologie nepotřebuje velké otevřené úhly svaru  $60^\circ$ , ale stačí jen  $40^\circ$  viz obr. 9. Další výhodou je výrazně lepší průvar svaru než u běžných MIG-MAG metod. [10], [11]

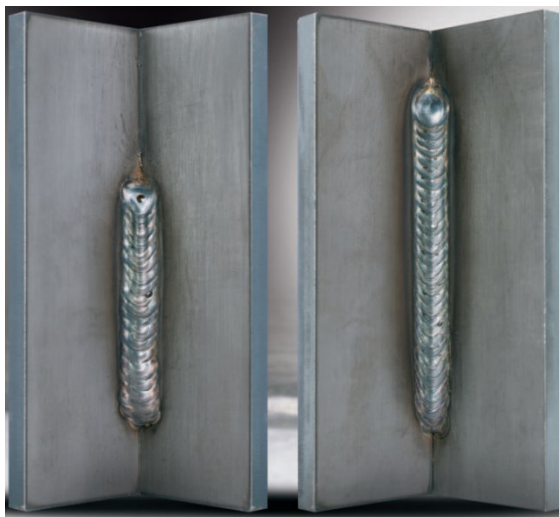


Obr. 9: Otevřený úhel svarů  $60^\circ$  pro běžný MIG-MAG (vlevo),  $40^\circ$  pro SpeedArc (vpravo) [10]

### 1.3.4 Technologie SpeedUp

Technologie byla vyvinuta pro svařování stoupavých svarů viz obr.10, a využívá kombinaci dvou fází oblouku. V první, "horké" fázi vysokého proudu s intenzivní vnesenou energií, dojde k optimálnímu natavení spojovaných materiálů. A pak, pomocí regulační technologie, přejde téměř bez rozstříku, do fáze "chladné". Regulační technologie vhodně reguluje vnesené

teplo, zajišťuje perfektní průvar a kvalitu spoje. Výhody této technologie spočívají v usnadnění svařování stoupavých svarů a urychlení celého procesu až o 100 % s funkcí PulseControl. [10], [11]



Obr. 10: Stoupavý svar provedený běžnou náročnou metodou MIG-MAG (vlevo) a jednoduchou metodou SpeedUp (vpravo) [10]

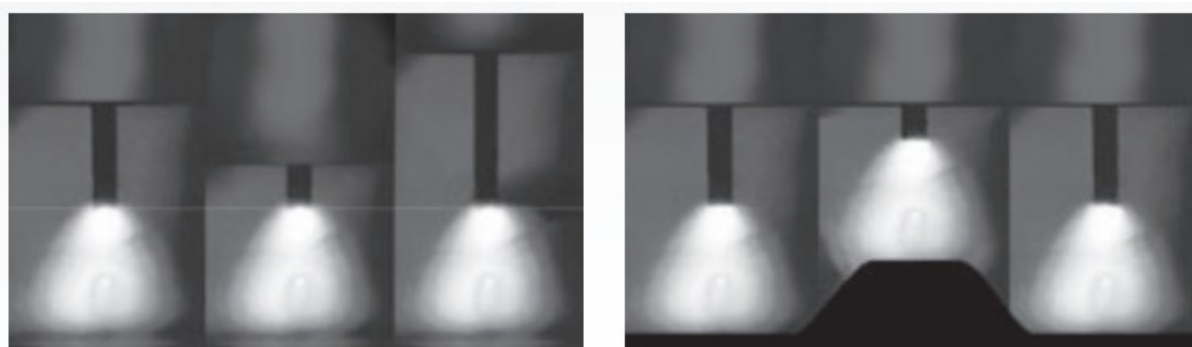
### 1.3.5 Technologie SpeedRoot

Dosud se pro svařování kořene, s co nejlepší kvalitou a nejmenší tvorbou pórů, používala běžná, ale pomalá metoda TIG. Proto byla vyvinuta nová technologie SpeedRoot, která nám zajišťuje rychlé svařování kořene jako u metody MIG-MAG, a se stejnou kvalitou svaru jako u metody TIG. Při použití běžné metody MIG-MAG, docházelo, kvůli zvyšování svařovacího proudu a napětí potřebného pro zkratový přenos kovu, k propadávání tavné lázně, nebo protlačování svaru skrze spáru, a při prostém snížení energie docházelo k neprovaření spoje. Proto byla vyvinuta technologie SpeedRoot s regulační technologií HighEnd, která zajišťuje chladný přenos kovu s následným uvolněním zkratu a cíleně sníženou energií. To nám zabezpečí vysokou stabilitu procesu a perfektní, mírně vypuklý svar. Navíc technologie SpeedRoot, v závislosti na poloze, využívá vlnění taveniny, jako podporu pro oddělování kapek a snížení vnesené energie. [10], [11]

### 1.3.6 Technologie Speed-TwinPuls

Tato technologie je nástupcem staršího procesu TwinPuls, který dokáže zvláště řídit fázi natavení a fázi ochlazení. Díky tomu dochází ke snížení vneseného tepla, a tím ke snížení

deformací. Svařování v různých polohách je jednodušší, vzhled svaru kvalitnější a celý proces probíhá s maximální rychlostí. [10], [11]



Obr. 11: Regulace elektrického oblouku podle změny vzdálenosti hořáku od materiálu [10]

Technologie také disponuje digitální regulací délky oblouku viz obr. 11, kdy při změnách vzdálenosti hořáku od materiálu, nebo změnách povrchu materiálu, regulace změnu během zlomku vteřiny odhalí a délku oblouku reguluje. To nám zajistí vysokou kvalitu svaru. Tato technologie je výhodná pro svařování hliníku a díky Speed procesu je až o 30 % rychlejší než běžné metody. [10], [11]

### 1.3.7 Technologie CMT

Firma Fronius vyvíjí přes 10 let, moderní technologii spojování materiálů CMT (Cold Metal Transfer), jejíž předností je stabilita, šetrnost, opakovatelnost procesu a nízké množství vneseného tepla. Metoda CMT vznikla vývojem metody MIG-MAG v rámci spojování ocele s hliníkem, kde dochází ke kombinaci specifických vlastností materiálů. Spojované materiály propůjčují dílu, nebo celému výrobku své vlastnosti. Tyto spoje byly dosud realizovány pomocí mechanických prostředků, nebo lepených spojů. Technologie CMT dovoluje téměř bezproudový přenos materiálu a díky regulaci posuvu drátu, zabudovanému přímo v hořáku, kdy dochází k posuvu drátu tam a zpět, také čistý a bez rozstřikový přenos materiálu. [12] Tato technologie se nejvíce využívá v robotizované výrobě, zejména v automobilovém průmyslu, nevýhodou jsou vyšší pořizovací náklady.

## **2 ZKOUŠKY MATERIÁLŮ A SVÁROVÝCH SPOJŮ**

Každá svařovaná součást nebo konstrukce musí splňovat určité požadavky z hlediska, jak bezpečnosti a spolehlivosti, tak i jakosti. Pro prokázání kvality svařovaných výrobků, je proto musíme podrobit několika zkouškám.

Zkoušky můžeme rozdělit na zkoušky nedestruktivní, kterými zjišťujeme vady na povrchu a uvnitř materiálu, a zkoušky destruktivní, pomocí nichž zjišťujeme, jak chemické složení materiálu, tak i strukturní charakteristiku a mechanické vlastnosti. [2]

### **2.1 Vizualní zkouška**

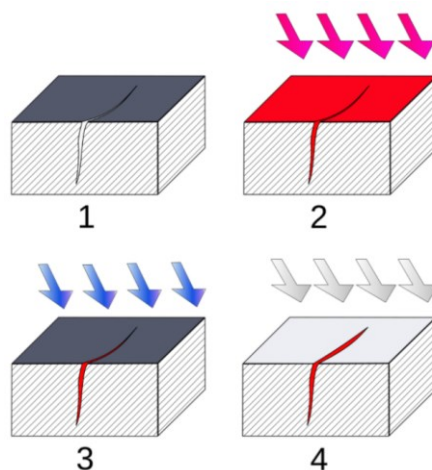
Vizuální kontrola patří mezi nedestruktivní zkoušky a vychází z normy ČSN EN ISO 17637 [20]. Tato zkouška zahrnuje zjišťování a vyhodnocování vad svarových spojů na povrchu kontrolované součásti. Během zkoušky se také kontroluje profil svaru a jeho převýšení, dále poškození povrchu, tvar svaru, jeho úplnost atd. Zkoušku dělíme na přímou, kontrolu pouhým okem, která je nejjednodušší a levná, a zkoušku nepřímou, kontrolu pomocí techniky, která je náročná a drahá. Vizualní zkouška se provádí také proto, abychom ověřili předepsané požadavky na úpravu povrchu před dalšími zkouškami. [13]

### **2.2 Kapilární zkouška**

Kapilární zkouška patří mezi nejpoužívanější nedestruktivní zkoušení svarových spojů. Vychází z normy ČSN EN ISO 3452-1. [21] Je také levná a nenáročná. Využívá se jak v automobilovém, tak i leteckém a energetickém průmyslu. Pomocí zkoušky zjišťujeme výskyt prasklin, trhlin, vměstků, pórů atd. na povrchu materiálu. [14]

Obecný postup kapilární zkoušky lze vidět na obrázku 12.

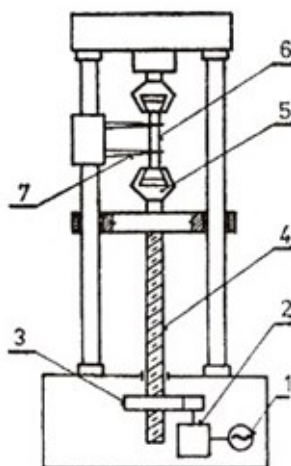
- 1) Zkoušený materiál očistíme a odmastíme.
- 2) Naneseme penetrační přípravek na povrch materiálů a počkáme 20-30 minut.
- 3) Odstraníme přebytečný Penetrant.
- 4) Nakonec na povrch nanese bílou vývojku a vyhodnotíme. [14]



Obr. 12: Postup kapilární zkoušky [14]

### 2.3 Zkouška tahem

V mém experimentu, pro ověření parametrů svařových spojů, použitých hliníkových materiálů popsaných v kapitole 3.1.1, jsem doplnkově využil destruktivní zkoušku, konkrétně zkoušku tahem. Tato zkouška patří, díky své jednoduchosti, mezi nejpoužívanější a nejrozšířenější metody zkoušení mechanických vlastností materiálu. Zkoušku provádíme pomocí zkušebního trhačního stroje, na zkušebních tyčích. Schéma mechanického trhačního stroje je vidět na obrázku č. 13. [2], [15]



Obr. 13: Mechanický trhační stroj [15]

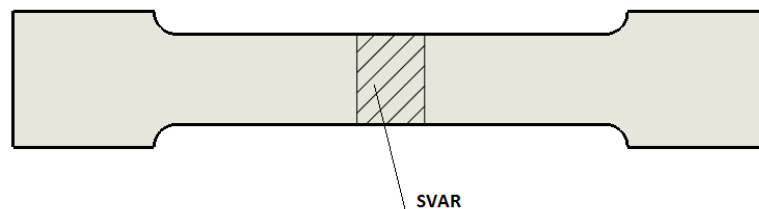
- 1) elektromotor, 2) převodovka, 3) ozubené kolo s maticí,
- 4) pohybový šroub, 5) upínací hlava, 6) zkušební těleso
- 7) snímač prodloužení zkušebního tělesa



Zkušební tyče, se odebírají obráběním vzorku ze součásti, pro kterou chceme určit mechanické vlastnosti. Na tvaru součásti závisí tvar i rozměry zkušební tyče. Tloušťka zkušební tyče je vždy stejná jako tloušťka součásti. Příčný průřez tyčí může být kruhový, obdélníkový nebo čtvercový. Zkušební tyče se upínají do trhacího stroje pomocí klínů a čelistí tak, aby zatížení působilo jen ve směru zkušební tyče.

Zkušební tyče odebíráme ze svárového spoje podle toho, jaký typ tahové zkoušky budeme provádět. Rozeznáváme příčnou tahovou zkoušku a podélnou tahovou zkoušku.

U příčné tahové zkoušky svarových spojů musíme vzorky pro zkušební tyče obrobit tak, aby osa svaru ležela uprostřed zkušební tyče, jak je vidět na obrázku 14. [2], [15]



Obr. 14: Zkušební tyč pro příčnou tahovou zkoušku

Tahová zkouška se řídí normou ČSN EN ISO 6892-1 [22] a má pět částí. Během zkoušky se deformuje zkušební tyč tahovým zatížením až do přetržení pro určení mechanických vlastností.

Z tahové zkoušky zjišťujeme lineární závislost deformace na napětí, mez kluzu  $R_e$ , mez pevnosti  $R_m$ , tažnost a kontrakci. [2], [15]

### **Závislost deformace na napětí**

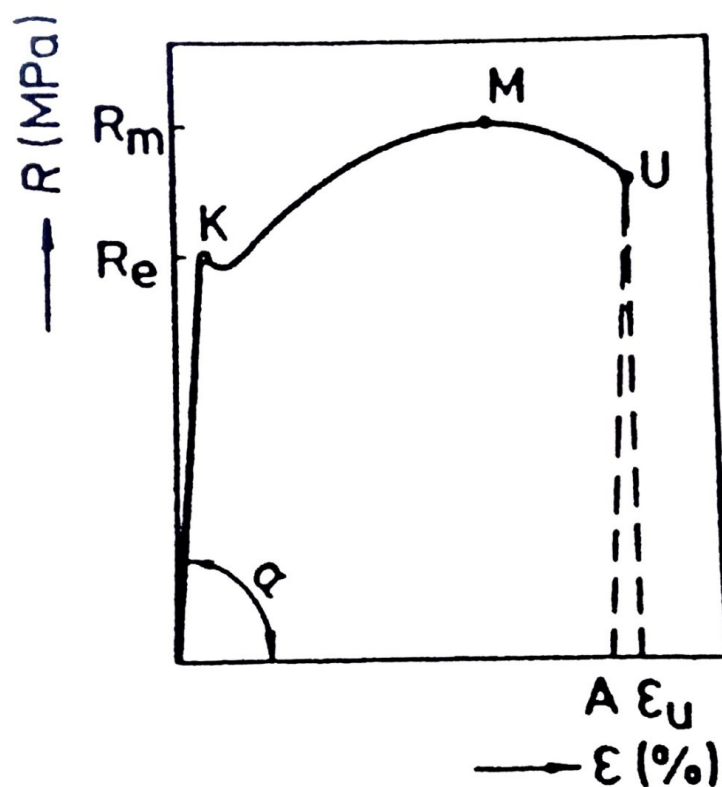
Vychází z Hookova zákona, viz obr. č. 15, podle rovnice:

$$R = \varepsilon \cdot E [2]$$

kde:  $R$  = napětí (MPa)

$\varepsilon$  = deformace (%)

$E$  = modul pružnosti v tahu (MPa)



Obr. 15: Tahový diagram (dle normy EN ISO 6892-1 [22] kovové materiály-Zkouška tahem)  
[2]

### Mez kluzu $R_e$ (MPa)

Mez kluzu je místo v tahovém diagramu (bod K), kdy dojde k prudkému nárůstu deformace a nastane přechod elastické deformace (vratná deformace) na plastickou (nevratná deformace).

### Mez pevnosti $R_m$ (MPa)

Na tahovém diagramu označen bodem M, v tomhle místě dojde k maximálnímu povolenému zatížení materiálu a následuje lom.

### Tažnost

Tažnost A je dána v procentech (%). Jedná se o schopnost materiálu plasticky se deformovat.

Tažnost se vypočítá podle vzorce:  $A = \frac{L-L_0}{L_0} \cdot 100(\%)$  [2]

kde:  $L$  = měřená délka zkušební tyče po přetržení (m)

$L_0$  = výchozí měřená délka zkušební tyče (m)

## **Kontrakce**

Jde o zúžení vzorku, udává se v procentech (%).

Kontrakce se vypočítá podle vzorce:  $Z = \frac{S_0 - S}{S_0} \cdot 100(\%)$  [2]

kde:  $S$  = průřez zkušební tyče v místě přetržení

$S_0$  = původní průřez výchozí tyče

### 3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V této části práce se budu věnovat samotnému experimentu, od jeho návrhu, přes jednotlivé kroky až po vyhodnocení výsledků.

#### 3.1 Obecný popis materiálů a zařízení použitých pro experiment

##### 3.1.1 Vybrané hliníkové materiály pro experimentální část

V mém experimentu jsem ověřoval parametry svarových spojů hliníkových materiálů určených pro konstrukci některých částí prototypu vozidla (např. battery boxu). Materiály, se kterými jsem pracoval, byly technický hliník EN AW-1050A, dále slitina EN AW-6060/T6, ve stavu po rozpouštěcím žíhání a umělém stárnutí, a slitina EN AW-5083/H111, ve stavu po žíhání a mírném deformačním zpevnění. Jejich obecné vlastnosti jsou popsány níže. Chemické složení těchto materiálů je vidět v tabulkách 1-3 a mechanické vlastnosti na konci podkapitoly v tabulce č. 4.

##### Technický hliník EN AW-1050A (Al99,5 W7)

EN AW-1050A je nelegovaný hliník, obsahující maximálně 0,5 % nečistot. Řadíme ho mezi nevytvrditelné materiály. Jeho pevnost můžeme zvýšit pouze tvářením za studena, např. válcováním. Má velmi dobrou tvárnost, výbornou korozivzdornost za běžných atmosférických podmínek, kterou můžeme zlepšit anodickou oxidací, a dobrou svařitelnost všemi běžně využívanými metodami svařování, hlavně metodami MIG a TIG. [16]

Tabulka č. 1: Chemické složení (hm. %) slitiny EN AW-1050A dle normy ČSN EN 573-3 [16], [23]

	Hustota	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Ostatní	Al
Slitina	g/cm <sup>3</sup>	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Min	Min
EN AW-6082	2,7	0,25	0,4	0,05	0,01	0,05	0,07	0,05	0,03	99,5

##### Slitina EN AW-6060 T6 (AlMgSi0,5 F22)

Slitina AlMgSi0,5 patří mezi vytvrditelné slitiny, má dobrou tvářitelnost za tepla a vysokou pevnost. Chemické složení téhle slitiny je zapsáno v tabulce č. 2. Materiál má dobrou odolnost proti korozi za běžných podmínek (+-21°C). Má velmi dobrou svařitelnost, hlavně metodou svařování elektrickým obloukem (MIG, TIG). Jelikož se jedná o vytvrditelnou slitinu, musíme mít na vědomí, že při svařování v místě svaru dochází ke snížení pevnosti,

kterou můžeme obnovit pomocí vhodného tepelného zpevnění, např. rozpouštěcím žíháním. [16]

Tabulka č. 2: Chemické složení (hm. %) slitiny EN AW-6060 T6 dle normy ČSN EN 573-3 [16], [23]

	Hustota	Si		Fe		Cu	Mn	Mg		Cr	Zn	Ti	Al
Slitina	g/cm <sup>3</sup>	Min	Max	Min	Max	Max	Max	Min	Max	Max	Max	Max	Zbytek
EN AW-6060	2,7	0,3	0,6	0,1	0,3	0,1	0,1	0,35	0,6	0,05	0,15	0,1	

### **Slitina EN AW-5083 H111 (AlMg4,5Mn W28)**

Slitinu AlMg4,5Mn řadíme mezi nevytvrditelné slitiny, což znamená, že její pevnost nemůžeme zpevnit tepelným zpracováním, ale můžeme ji zvýšit tvářením za studena. Slitina je pevná s vynikající odolností proti korozi jak na vzduchu, tak v mořském prostředí. Stejně jako materiály popsané výše, je i tahle slitina velmi dobře svařitelná běžně používanými metodami svařování, a hlavně metodou MIG a TIG. [16]

Tabulka č. 3: Chemické složení (hm. %) slitiny EN AW-5083 H111 dle normy ČSN EN 573-3 [16], [23]

	Hustota	Si	Fe	Cu	Mn		Mg		Cr		Zn	Ti	Al
Slitina	g/cm <sup>3</sup>	Max	Max	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Max	Max	Zbytek
EN AW-5083	2,7	0,4	0,4	0,1	0,4	1	4	4,9	0,05	0,25	0,25	0,15	

Následující tabulka popisuje mechanické vlastnosti slitin podle normy ČSN EN 485-2 [24]:

Tabulka č. 4: Mechanické vlastnosti jednotlivých materiálů [16]

Slitina	Mez kluzu Rp0,2 [MPa]	Pevnost v tahu Rm [MPa]	Tažnost A [%]	Tvrdost HB
EN AW-1050A	70	90-130	5	32
EN AW-6060/T6	150	190	8	65
EN AW-5083/H111	125	275-350	13-15	75

### 3.1.2 Přídavný materiál OK AUTROD 5087 (AlMg4,5MnZr)

V mém experimentu, při svařování hliníkových materiálů metodou MIG, byl použit přídavný materiál OK AUTROD 5087 (AlMg4,5MnZr). Materiál je vhodný pro svařování slitin hliníku s obsahem Mg do 5 %, například AlMg4,5Mn, AlMg5 nebo AlMgSi1 a jiné. Je také vhodný tam, kde je vyžadována vyšší pevnost v tahu. Díky přídavku Zr má vyšší odolnost proti vzniku trhlin za tepla. Chemické složení a mechanické vlastnosti lze vidět v tabulkách č. 5 a 6. [17]

Tabulka č. 5: Chemické složení přídavného materiálu (%) AUTROD 5087 [17]

Mn	Cu	Zn	Ti	Si	Zr	Mg	Cr	Fe	Al
0,8	0,01	0,01	0,08	0,04	0,11	4,7	0,08	0,12	Zbytek

Tabulka č. 6: Mechanické vlastnosti přídavného materiálu AUTROD 5087 [17]

Mez pevnosti v tahu [MPa]	Mez kluzu [MPa]	Prodloužení [%]
280	130	30

### 3.1.3 Zařízení pro svařování metodou MIG

V mém experimentu byl použit svařovací přístroj značky LORCH, ze série S3 SpeedPulse XT viz obr. 16. Tento zdroj se vyznačuje perfektní pulzní technologií. Pulzní technologie je ve vývoji již přes 30 let, a už od začátku vývoje, byla technologie pulzního svařování, v oblasti svařování hliníku a jeho slitin, na nejvyšší úrovni a je na ní dodnes. Hlavní předností je velmi snadná kontrola elektrického oblouku a rychlost svařovacího procesu, která je až o 48 % rychlejší než běžné MIG-MAG metody, a zároveň nám zaručí vysokou produktivitu při optimálním průvaru, a hlavně odpadá dodatková brousící práce díky perfektní kvalitě spoje. [10], [11]



Obr. 16: Svařovací zařízení LORCH [11]

Dále tohle zařízení disponuje několika režimy popsaných v kapitole 1.3.

### 3.2 Postup experimentu

- 1) Příprava a úprava svarových ploch materiálů, vybraných pro experiment.
- 2) Provedení tupých svarů se zvolenými svařovacími parametry.
- 3) Návrh a provedení nedestruktivních zkoušek svarových spojů.
- 4) Návrh a zhotovení zkušebních vzorků.
- 5) Návrh a provedení destruktivní zkoušky svarových spojů – zkouška tahem.
- 6) Zpracování výsledků.

#### 3.2.1 Příprava a úprava svarových ploch

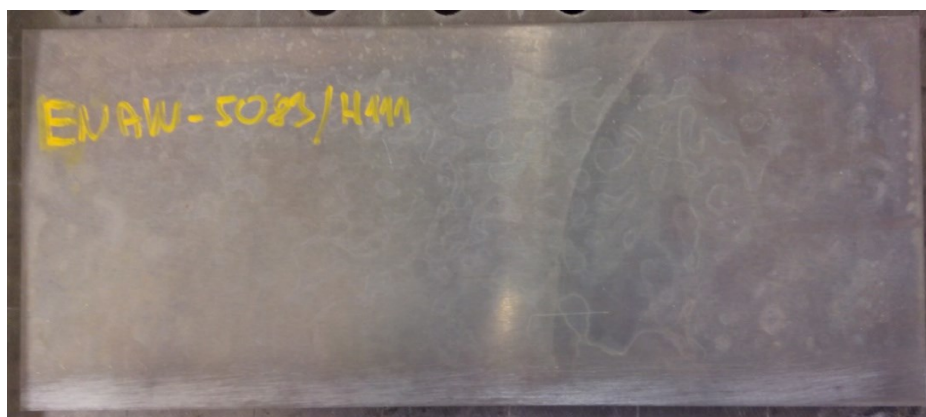
Nejdříve jsem si nařezal materiály popsané v kapitole 3.1.1 na jednotlivé plechy o rozměrech 350\*150 mm podle obrázku č. 17.



Obr. 17: Rozměry hliníkového plechu pro experiment



Abych docílil dokonalého spojení základního materiálu a svarového kovu, provedl jsem, ještě před svařováním, úpravu svarových ploch na spojovaných materiálech. Svarové plochy jsem očistil, odmastil, odstranil nátěry, rzi, a hlavně oxidickou vrstvičku  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Mastnotu jsem odstranil technickým benzínem, a povrch jsem očistil ocelovým kartáčem, viz obrázek 18.



Obr. 18: Odmaštěné a očištěné plechy hliníkové slitiny EN AW-5083 H111

### 3.2.2 Provedení tupých svarů se zvolenými svařovacími parametry

Následně bylo provedeno několik tupých spojů, a z nich, pro experiment, bylo vybráno 12 vzorků se svařovacími parametry dle tabulky č. 7. Jako přídavný materiál byl u všech spojů použit materiál OK AUTROD 5087, popsáný v kapitole 3.1.2. Pracovalo se s ochrannou atmosférou tvořenou čistým argonem (ARCAL, AIR LIQUIDE).

Tabulka č. 7: Svařovací parametry pro experiment

Č. vzorku	Materiál	Tloušťka materiálu [mm]	Svařovací proud [A]	Svařovací napětí [V]	Rychlost posuvu drátu [m/min]	Svař. rychlost [mm/s]	Vnesené teplo [kJ/mm]	Proces
1	EN AW-1050	0,8	72	11,9	3,2	8,9	0,1	SC
2	EN AW-1050	0,8	72	11,9	3,2	5,2	0,16	SC
3	EN AW-1050	0,8	72	11,9	3,2	8,1	0,11	SC
4	EN AW-6060	2	106	12,9	5,2	6,27	0,22	SA
5	EN AW-6060	2	110	13,1	5,5	5,82	0,25	SA
6	EN AW-6060	2	115	13,4	5,5	8,89	0,17	SA
7	EN AW-5083	2	90	11,7	4,6	6,47	0,16	SA
8	EN AW-5083	2	97	13	5,1	7,67	0,16	SA
9	EN AW-5083	2	103	12,7	5,8	11,79	0,11	SA
10	EN AW-5083	3	150	16,0	8	6,1	0,4	SP
11	EN AW-5083	3	155	16,2	8	6,1	0,4	SP
12	EN AW-5083	3	167	18,8	8	7,78	0,4	SP

Zkratky procesů: SC – SpeedCold, SA – SpeedArc, SP – SpeedPulse

### 3.2.3 Návrh a provedení nedestruktivních zkoušek svarových spojů

Byla provedena nedestruktivní zkouška všech vybraných vzorků svarových spojů, jestli neobsahují nějaké vady, jako například trhliny, póry, neprůvary, studené spoje, zápaly atp.

#### Vizuální zkouška

Nejdříve byla provedena vizuální kontrola všech spojů přímou metodou, dle normy ČSN EN ISO 17637. [20] Vyhodnocení bylo provedeno podle normy ČSN EN ISO 10042. [25] Na obrázcích 19 a 20, lze vidět vzhled svarových spojů bez povrchových vad. Na obrázku č. 21, vidíme vzorek č. 1 s neprovařeným kořenem, tento vzorek zkouškou neprošel.



Obr. 19: Vzhled svarového spoje kontrolovaného přímou vizuální metodou, vzorek č. 11,  
EN AW-5083/H111



Obr. 20: Vzhled svarového spoje kontrolovaného přímou vizuální metodou, vzorek č. 5,  
EN AW-6060/T6



Obr. 21: Neprovařený kořen svarového spoje kontrolovaného přímou vizuální metodou,  
vzorek č. 1, EN AW-1050A

## Kapilární zkouška

Poté byla provedena, na výskyt povrchových vad, kapilární zkouška dle normy ČSN EN ISO 3452-1 [21] a její vyhodnocení podle normy ČSN EN ISO 23277. [26] Během zkoušky byl jako první pečlivě očištěn a odmaštěn povrch svarového spoje. Poté byl na povrch nástřikem nanesen penetrant RED (obr. 22). Doba penetrace byla 30 minut. Po aplikaci penetrantu viz obr. 23, byl přebytek odstraněn navlhčeným hadrem, a po uplynutí penetrační doby, byla na povrch spoje nanесena vývojka REINKE WEISS (obr. 22). Po 20 minutách byla provedena kontrola spoje na přítomnost povrchových vad a vyhodnocení dle normy ČSN EN ISO 23277. [26] Na povrchu zkoušených spojů u vzorků 2, 5, 8 a 11, nebyla nalezena žádná vada, viz obr. 24-27, jen z důvodu nedočištění penetrantu se na vzorcích mohla objevit falešná indikace vady. Všechny spoje tak odpovídali kvalitě dle výše zmíněné normy. Na obrázku č. 28, můžeme vidět vzorek č. 6 s indikací povrchových vad. [14]

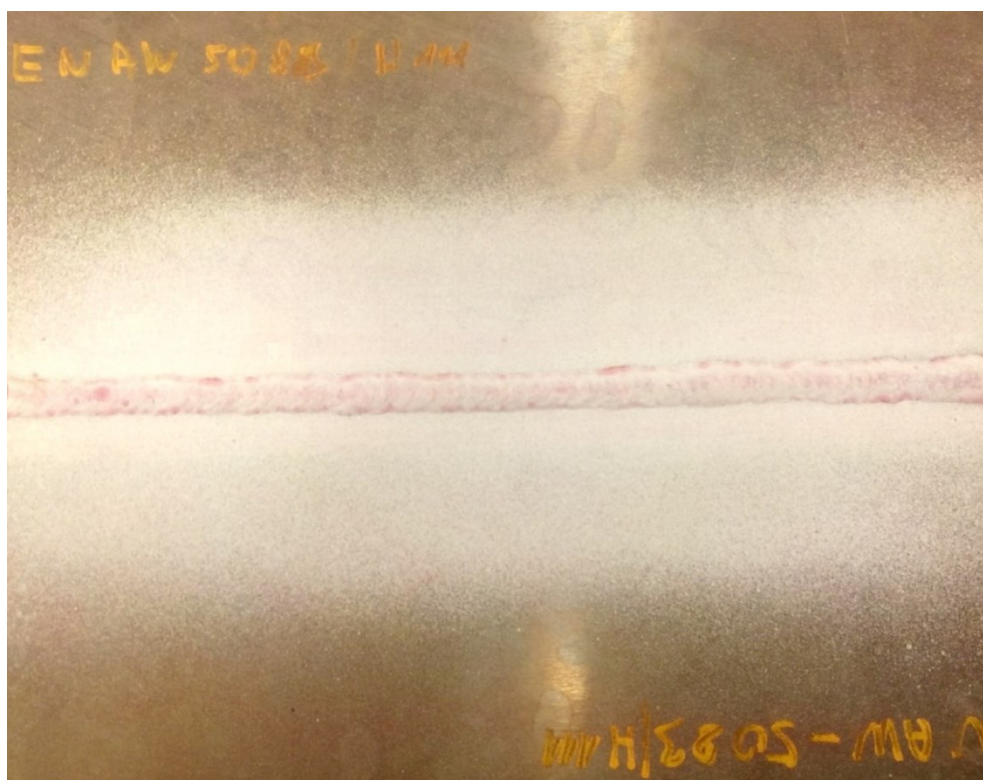


Obr. 22: Penetrant RED (vlevo), vývojka REINKE WEISS (vpravo)





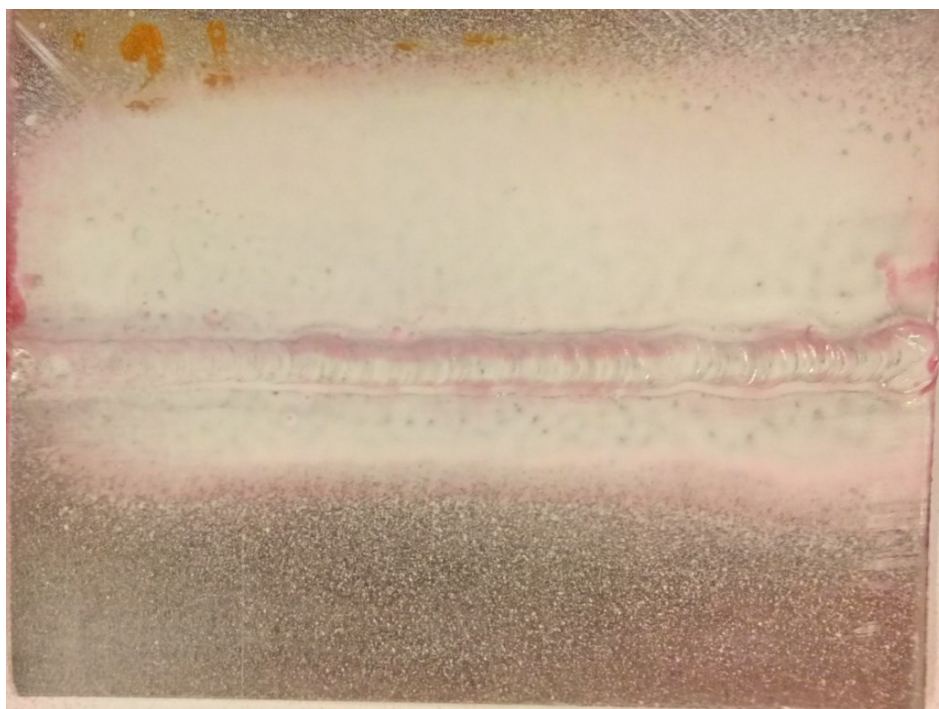
Obr. 23: Aplikovaný penetrant na kontrolovaný svarový spoj, vzorek č. 11,  
EN AW-5083/H111



Obr. 24: Kontrolovaný svarový spoj penetrační metodou po aplikaci vývojky bez výskytu  
povrchových vad, vzorek č. 11, EN AW-5083/H111



Obr. 25: Kontrolovaný svarový spoj penetrační metodou po aplikaci vývojky bez výskytu povrchových vad, vzorek č. 5, EN AW-6060/T6

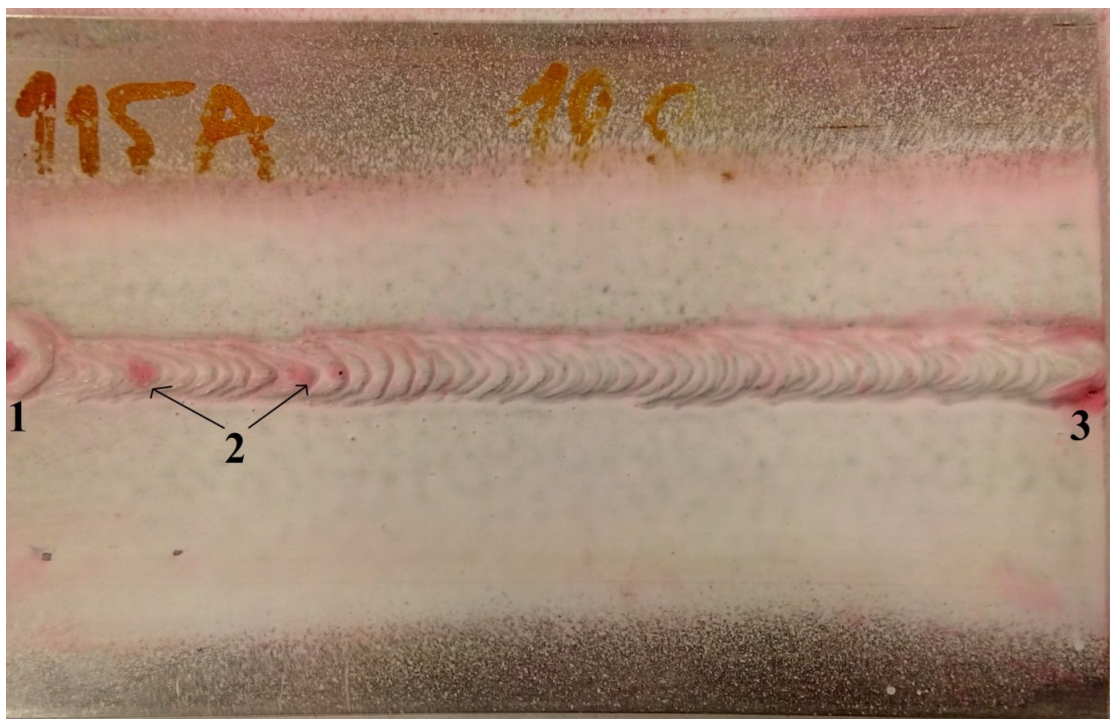


Obr. 26: Kontrolovaný svarový spoj penetrační metodou po aplikaci vývojky bez výskytu povrchových vad, vzorek č. 2, EN AW-1050A





Obr. 27: Kontrolovaný svarový spoj penetrační metodou po aplikaci vývojky bez výskytu povrchových vad, vzorek č. 8, EN AW-5083/H111

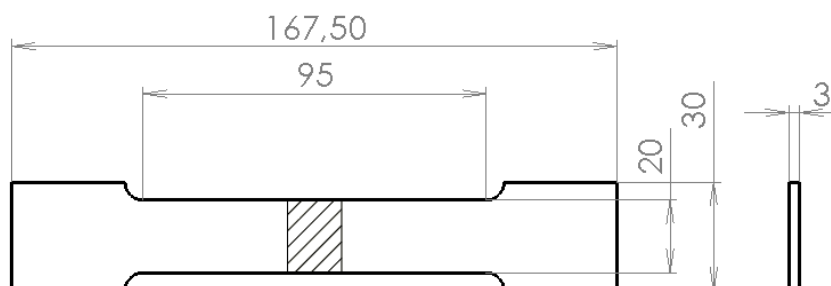


Obr. 28: Kontrolovaný svarový spoj penetrační metodou po aplikaci s výskytem povrchových vad, 1) pór ve staženině, 2) povrchový pór, 3) protáhlý pór, vzorek č. 6, EN AW-6060/T6

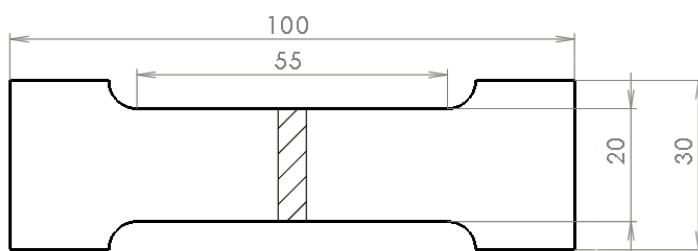


### 3.2.4 Návrh a zhotovení zkušebních vzorků

Pro tahovou zkoušku jsem vybral vzorky č. 2, 5, 8 a 11. Podle normy ČSN EN ISO 6892-1 [22] jsem si připravil zkušební vzorky dle obrázku 29 a 30. Reálný zkušební vzorek lze vidět na obrázku 31 a 32.



Obr. 29: Rozměry zkušební tyče podle ČSN EN ISO 6892-1 [22], pro materiál EN AW-5083 o tloušťce 3 mm



Obr. 30: Rozměry zkušební tyče podle ČSN EN ISO 6892-1 [22], pro vzorky č. 2, 5 a 8



Obr. 31: Zkušební vzorek pro tahovou zkoušku, materiál EN AW-5083 o tloušťce 3 mm



Obr. 32: Zkušební vzorek pro tahovou zkoušku, materiál EN AW-5083 o tloušťce 2 mm

### 3.2.5 Návrh a provedení destruktivní zkoušky svarových spojů

K ověření parametrů svarových spojů, na připravených zkušebních vzorcích, které jsem vybral na základě vizuální a kapilární zkoušky viz tabulka č. 8, jsem doplňkově uplatnil zkouškou tahem. Celkem jsem měl 12 vzorků, od každého materiálu vždy 3, kdyby nastala případná odchylka. Trhací zkouška byla prováděna při rychlosti zatěžování 2 mm/s, trhacím přístrojem Multipurpose servohydraulic universal testing machine series LFV 100 kN, viz obr. 33.

Tabulka č. 8: Svařovací parametry vybraných vzorků pro experiment

Č. vzorku	Materiál	Tloušťka materiálu [mm]	Svařovací proud [A]	Svařovací napětí [V]	Rychlost posuvu drátu [m/min]	Svař. rychlost [mm/s]	Vnesené teplo [kJ/mm]	Proces
2	EN AW-1050	0,8	72	11,9	3,2	5,2	0,16	SC
5	EN AW-6060	2	110	13,1	5,5	5,82	0,25	SA
8	EN AW-5083	2	97	13	5,1	7,67	0,16	SA
11	EN AW-5083	3	155	16,2	8	6,1	0,40	SP

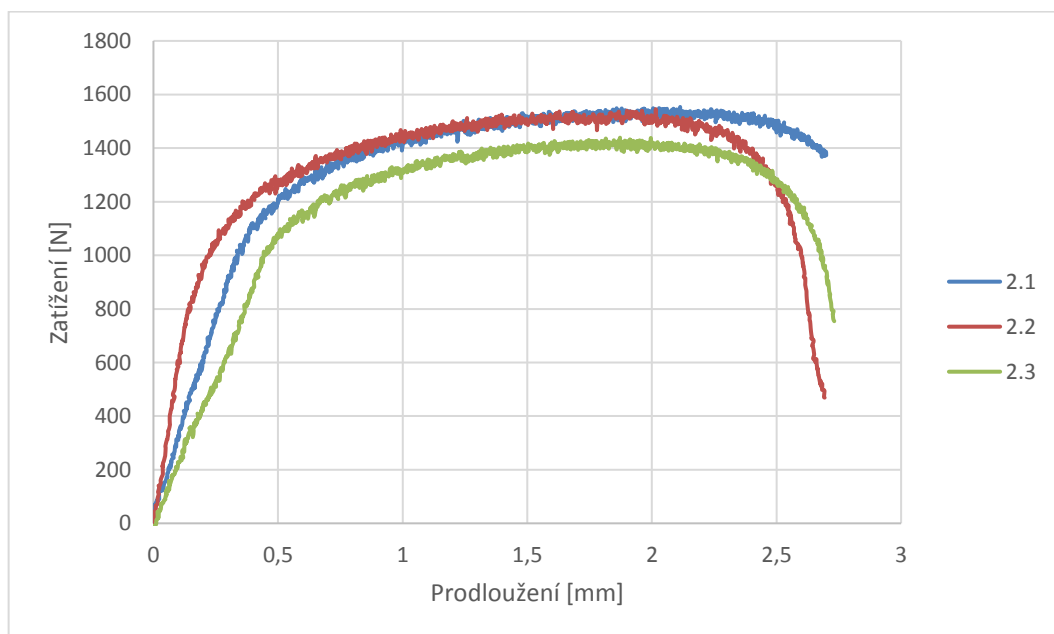


Obr. 33: Trhací stroj série LFV 100 kN, využitý při experimentu [18]

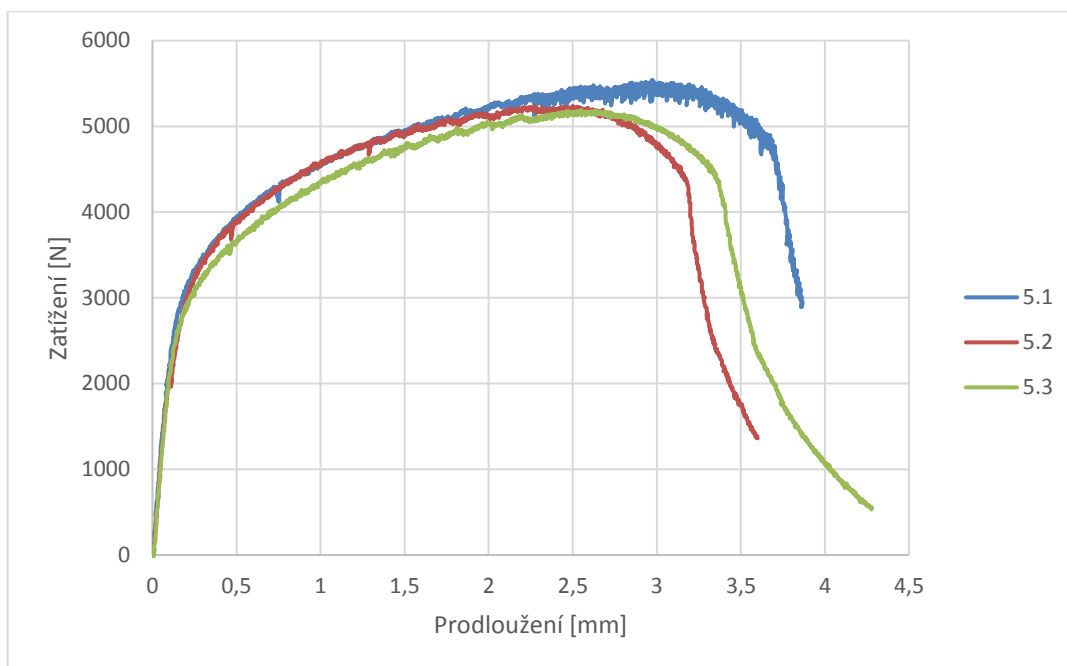
### 3.2.6 Zpracování výsledků

Z tahové zkoušky jsem získal hodnoty, které jsem zpracoval a vytvořil grafy, viz graf č. 1–4.

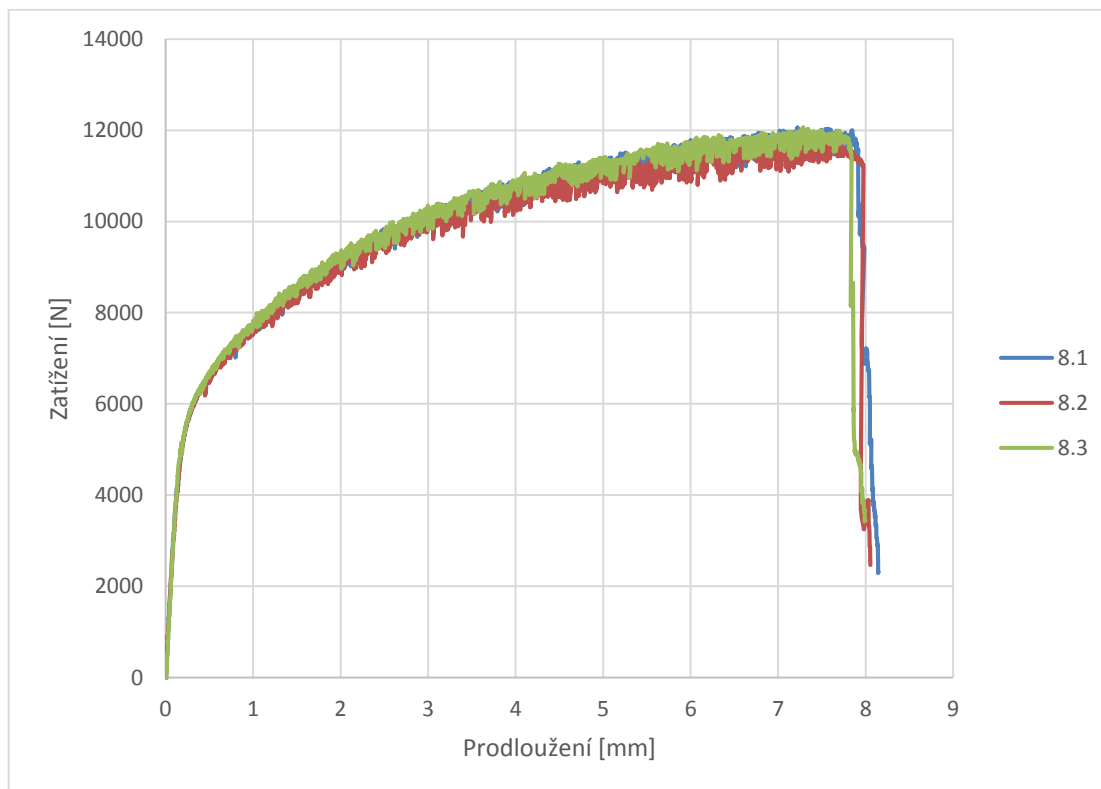
Graf č. 1: Závislost zatížení [N] na prodloužení [mm] pro vzorek č. 2, materiál EN AW-1050A



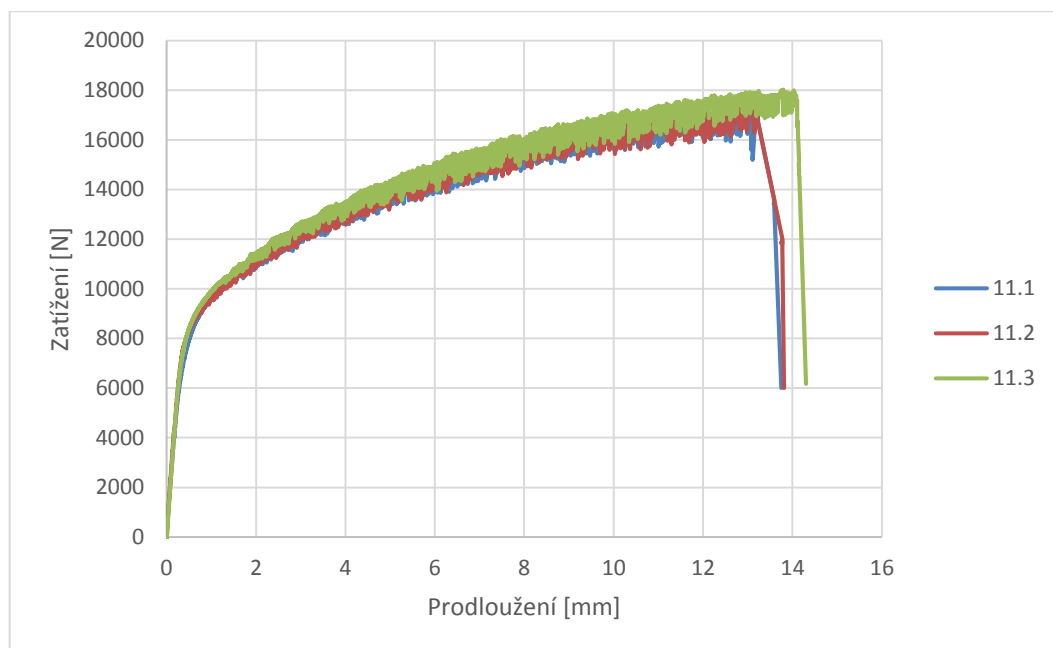
Graf č. 2: Závislost zatížení [N] na prodloužení [mm] pro vzorek č. 5, materiál  
EN AW-6060/T6



Graf č. 3: Závislost zatížení [N] na prodloužení [mm] pro vzorek č. 8, materiál  
EN AW-5083/H111 o tloušťce 2 mm



Graf č. 4: Závislost zatížení [N] na prodloužení [mm] pro vzorek č. 11 materiál  
EN AW-5083/H111 o tloušťce 3 mm



Z grafů jsem odečetl mechanické vlastnosti materiálů po svařování a zapsal do tabulky, viz tabulka č. 9.

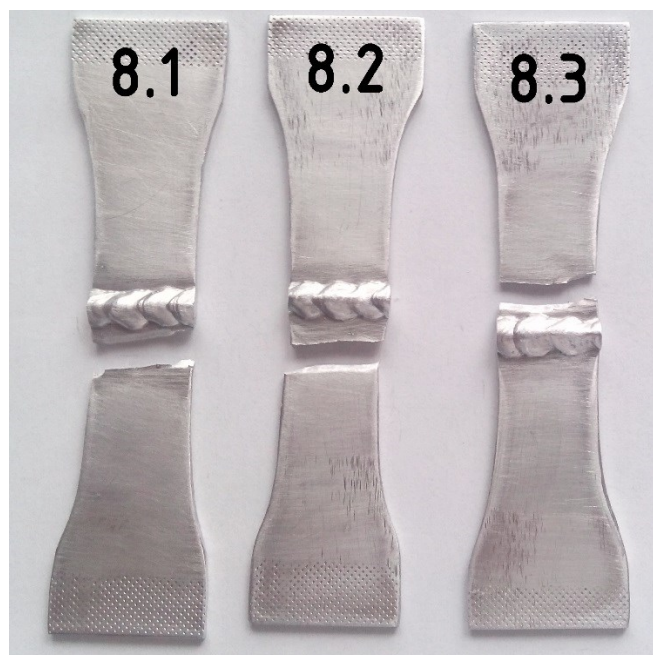
Tabulka č. 9: Naměřené mechanické vlastnosti z tahové zkoušky

Vzorek č.	Materiál	Tloušťka materiálu [mm]	Fmax [N]	Mez kluzu Rp0,2 [MPa]	Mez pevnosti Rm [MPa]	Tažnost A [%]
2.1	EN AW-1050	0,8	1554	74,90	98,47	6
2.2	EN AW-1050	0,8	1545	70,87	99,47	5,2
2.3	EN AW-1050	0,8	1439	74,88	93,1	5,3
5.1	EN AW-6060	2	5543	85,34	142,12	7,5
5.2	EN AW-6060	2	5237	84,26	134,28	7,04
5.3	EN AW-6060	2	5192	79,7	133,25	8,5
8.1	EN AW-5083	2	12065	145,39	304,67	16,2
8.2	EN AW-5083	2	11839	148,68	298,95	16,42
8.3	EN AW-5083	2	12066	146,69	303,17	15,8
11.1	EN AW-5083	3	17338	135,87	300,07	15,63
11.2	EN AW-5083	3	17368	143,39	301,22	15,82
11.3	EN AW-5083	3	18027	146,53	311,34	16,88

Z obrázků 34–37, kde jsou zobrazeny vzorky po tahové zkoušce je patrné, že k přetržení vzorků došlo mimo oblast svaru. Z toho vyplívá, že zvolené parametry těchto svarových spojů jsou optimální.



Obr. 34: Vzorek č. 2, materiál EN AW – 1050A po přetrnutí



Obr. 35: Vzorek č. 8, materiál EN AW – 5083/H111, o tloušťce 2 mm, po přetrnutí



Obr. 36: Vzorek č. 11, materiál EN AW – 5083/H111 o tloušťce 3 mm, po přetrhnutí



Obr. 37: Vzorek č. 5, materiál EN AW – 6060/T6 po přetrhnutí



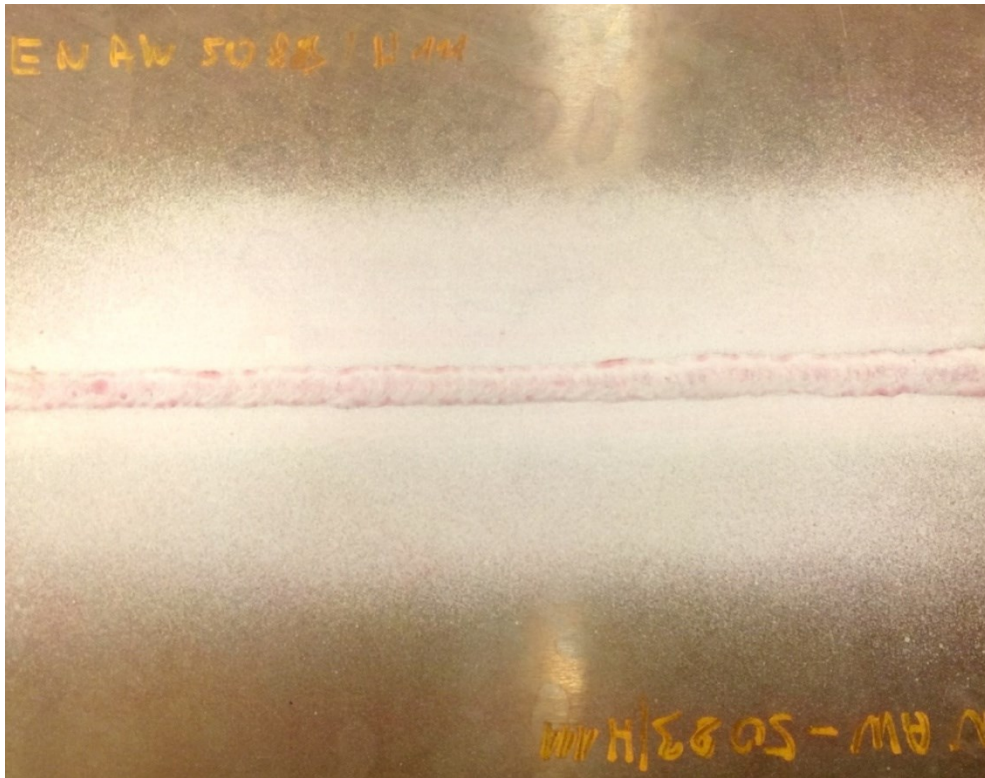
## 4 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Pro ověření parametrů svarových spojů, byla nejdříve provedena vizuální kontrola všech spojů přímou metodou, dle normy ČSN EN ISO 17637. [20] Vyhodnocení bylo provedeno podle normy ČSN EN ISO 10042. [25] Na obrázku č. 38 můžeme vidět vzorek č. 11, materiálu EN AW-5083/H111 bez povrchových vad, který prošel zkouškou. Vizuální kontrole vyhověly vzorky č. 2, 5, 6, 8, 10 a 11.



Obr. 38: Vzhled svarového spoje kontrolovaného přímou vizuální metodou, vzorek č. 11, EN AW-5083/H111

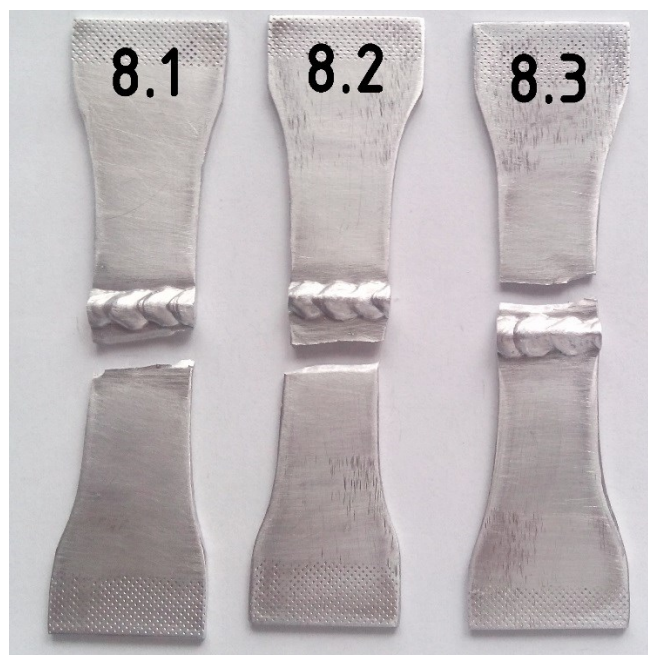
Dále byla provedena, na výskyt povrchových vad, kapilární zkouška dle normy ČSN EN ISO 3452-1 [21] a její vyhodnocení podle normy ČSN EN ISO 23277. [26] Vzorky č. 2, 5, 8 a 11, které byly bez povrchových vad, vyhověly zkoušce.



Obr. 39: Kontrolovaný svarový spoj penetrační metodou po aplikaci vývojky bez výskytu povrchových vad, vzorek č. 11, EN AW-5083/H111

Následně byla u vzorků č. 2, 5, 8 a 11 doplnkově provedena tahová zkouška. Z tahové zkoušky jsem určil mechanické vlastnosti materiálů po procesu svařování. Mechanické vlastnosti materiálů před a po svařování se příliš nelišili.

Z natrhaných vzorků, viz obr. 40, který zobrazuje vzorek č. 8, materiál EN AW-5083/H111 po přetržení, můžeme vidět, že k přetržení vzorků došlo mimo oblast svaru.



Obr. 40: Vzorek č. 8, materiál EN AW – 5083/H111, o tloušťce 2 mm, po přetrhnutí

Z výše provedených nedestruktivních a destruktivních zkoušek vyplývá, že svařovací parametry, u vzorků č. 2, 5, 8 a 11 byly zvoleny optimálně. Parametry jsou uvedeny v tabulce č. 10

Tabulka č. 10: Svařovací parametry vybraných vzorků pro experiment

Č. vzorku	Materiál	Tloušťka materiálu [mm]	Svařovací proud [A]	Svařovací napětí [V]	Rychlost posuvu drátu [m/min]	Svař. rychlost [mm/s]	Vnesené teplo [kJ/mm]	Proces
2	EN AW-1050	0,8	72	11,9	3,2	5,2	0,16	SC
5	EN AW-6060	2	110	13,1	5,5	5,82	0,25	SA
8	EN AW-5083	2	97	13	5,1	7,67	0,16	SA
11	EN AW-5083	3	155	16,2	8	6,1	0,40	SP

## **Závěr**

V dnešní době existuje několik metod a technologií pro svařování hliníku a jeho slitin, které se neustále vyvíjí. Při svařování lehkých materiálů, jako je hliník a jeho slitiny, musíme dbát na množství vneseného tepla do spojovaných materiálů. Čím více tepla vneseme při svařování do spojovaných materiálů, tím větší bude vnitřní pnutí a deformace svarů. Proto je hlavním cílem vývoje, hlavně u tenkých plechů, aby teplo, vnesené do spojovaných materiálů, bylo co nejmenší, a zároveň kvalita svaru co nejvyšší.

Cílem této bakalářské práce bylo ověřit svařovací parametry svarových spojů vytvořených technologií s nízkým vneseným teplem. Experiment jsem prováděl na hliníkových materiálech, EN AW-1050A, EN AW-6060/T6, a EN AW-5083/H111, které by následně měly být využity při konstrukci prototypu vozidla (např. battery boxu). Byla použita technologie svařování MIG s nízkým vneseným teplem. Pro experiment bylo zvoleno celkem 12 tupých svarových spojů třech materiálů o různých tloušťkách (vzorky č. 1-12). Parametry svařování byly ověřovány nedestruktivními zkouškami, a to zkouškou vizuální a penetrační. Na 4 vzorcích, které vyhověli vizuální i penetrační zkoušce, byla doplňkově ještě provedena tahová zkouška.

Z experimentu je patrné, že u materiálů EN AW-1050A tloušťky 0,8 mm (vzorek č. 2), EN AW-6060/T6 (vzorek č. 5) a EN AW-5083/H111 tloušťky 2 mm (vzorek č. 8) a 3 mm (vzorek č. 11) byly, zvolené svařovací parametry, doladěny.

Výstupem, této bakalářské práce, jsou 4 předběžné specifikace postupu svařování, výše uvedených materiálů a jejich tloušťek (viz. Příloha č.1–4).

## Seznam použité literatury

1. **KOUKAL, Jaroslav, Drahomír SCHWARZ a Jiří HAJDÍK.** *Materiály a jejich svařitelnost.* Ostrava : Český svářečský ústav, 2009. ISBN 978-80-248-2025-5.
2. **BARTÁK, Jiří, Václav PILOUS a Rudolf KOVAŘÍK.** *Učební texty pro evropské svářečské specialisty, praktiky a inspektory.* Ostrava : ZEROSS, 2002. ISBN 80-85771-97-7.
3. **Jaroslav, Ing. Hájek.** Konstrukce. [Online] 10. Prosinec 2014. [Citace: 26. Březen 2018.] <http://www.konstrukce.cz/clanek/hlinik-a-moznosti-jeho-svarovani/%202014>. ISSN 1803-8433.
4. **Kolář, Ing. Vladislav.** <http://www.cws-anb.cz>. [Online] 23. 10 2015. [Citace: 25. 4 2018.] <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=502>.
5. **KAUFMAN, John Gilbert.** *Introduction to aluminum alloys and tempers.* Materials Park : ASM International, 2000. ISBN 0-87170-689-X.
6. **DOLEJSKÝ, Tomáš.** *Učebnice pro základní kurz svařování tavící se elektrodou: (MIG/MAG svařování). 4. aktualizované vydání.* Ostrava : ZEROSS, 2016. ISBN 978-80-85771-07-7..
7. **Malina, Zdeněk.** *Učebnice pro základní kurz svařování tavící se elektrodou: (MIG/MAG svařování). 5. vyd.* Ostrava : Zeross, 2000. ISBN 80-85771-76-4.
8. **ZEROSS.** *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů.* Ostrava : ZEROSS, 2001. ISBN 80-85771-81-0.
9. **KUOPPA, Jan.** *Design handbook: structural design and manufacturing in high-strength steel.* . Borlänge : SSAB, 2012. ISBN 978-91-637-1032-2..
10. **Lorch Schweißtechnik GmbH.** Princip Kvalita. [Online] 2018. [Citace: 26. 4 2018.] [http://www.svareci-technika.eu/katalogy/LORCH\\_katalog.pdf](http://www.svareci-technika.eu/katalogy/LORCH_katalog.pdf).
11. —. Lorch. [Online] 2018. [Citace: 26. 4 2018.] <https://www.lorch.eu/cs/>.
12. **Fronius.** fronius\_ceska\_republika. [Online] 2017. [Citace: 28. 4 2018.] [https://www3.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-BDDF5046-382D6853/fronius\\_ceska\\_republika/hs.xsl/29\\_3917.htm#.WvDJLaSFOM9](https://www3.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-BDDF5046-382D6853/fronius_ceska_republika/hs.xsl/29_3917.htm#.WvDJLaSFOM9).

13. **Ph.D., Ing. Hrstka David.** Konstrukce. [Online] 3. 12 2013. [Citace: 25. 3 2018.] <http://www.konstrukce.cz/clanek/vizualni-kontrola-svaru-pozadavky-vyrobkovych-norem-vady-svaru-z-praxe-certifikace-personalu-ndt/>. ISSN 1803-8433.
14. **Weldinspect s.r.o.** Weldinspect s.r.o. *Kapilární zkoušení*. [Online] 2015. [Citace: 25. 3 2018.] <https://weldinspect.cz/metody/kapilarni-zkouseni/>.
15. **PODHORA, Jiří.** *Destruktivní zkoušení základních materiálů a svarových spojů*. Brno : TDS Brno-SMS, 2005. ISBN 80-903386-4-X.
16. **Berka, Pavel.** Alunet. [Online] 2018. [Citace: 5. 4 2018.] <http://www.alunet.cz/>.
17. **ESAB.** ESAB. [Online] 2018. [Citace: 12. 4 2018.] <http://www.esab.cz/cz/cz/index.cfm>.
18. **Melytec.** melytec. [Online] 2018. [Citace: 29. 4 2018.] <https://www.melytec.ru/production/mechanicaltest/servogid/lfv/detail/napolnaya-mashina-lfv100-1/>.
19. **ČSN EN ISO 4063 (050011) A** Svařování a příbuzné procesy – Přehled metod a jejich číslování. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011. Dostupné také z: <http://csnonline.agentura-cas.cz/>
20. **ČSN EN ISO 17637 (051180) A** Nedestruktivní zkoušení svarů – Vizuální kontrola tavných svarů. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017. Dostupné také z: <http://csnonline.agentura-cas.cz/>
21. **ČSN EN ISO 3452-1 (015018) A** Nedestruktivní zkoušení – Kapilární zkouška. Část 1, Obecné zásady = Non-destructive testing – Penetrant testing. Part 1, General principles. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015. Dostupné také z: <http://csnonline.agentura-cas.cz/>
22. **ČSN EN ISO 6892-1 (420310) A** Kovové materiály – Zkoušení tahem. Část 1, Zkušební metoda za pokojové teploty = Metallic materials – Tensile testing. Part 1, Method of test at room temperature. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017. Dostupné také z: <http://csnonline.agentura-cas.cz/>
23. **ČSN EN 573-3 (421401) A** Hliník a slitiny hliníku – Chemické složení a druhy tvářených výrobků. Část 3, Chemické složení a druhy výrobků = Aluminium and aluminium alloys - Chemical composition and form of wrought products. Part 3, Chemical composition and form

of products. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014. Dostupné také z: <http://csnonline.agentura-cas.cz/>

24. **ČSN EN 485-2 (424081) A** Hliník a slitiny hliníku – Plechy, pásy a desky. Část 2, Mechanické vlastnosti = Aluminium and aluminium alloys - Sheet, strip and plate. Part 2, Mechanical properties. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017. Dostupné také z: <http://csnonline.agentura-cas.cz/>

25. **ČSN EN ISO 10042 (050111) A** Svařování – Svarové spoje hliníku a jeho slitin zhotovené obloukovým svařováním – Určování stupňů jakosti. Praha: Český normalizační institut, 2006. Dostupné také z: <http://csnonline.agentura-cas.cz/>

26. **ČSN EN ISO 23277 (051176) A** Nedestruktivní zkoušení svarů – Zkoušení kapilární metodou – Stupně přípustnosti. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016. Dostupné také z: <http://csnonline.agentura-cas.cz/>

27. **ČSN EN ISO 15614-2 (050314) A** Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů – Zkouška postupu svařování. Část 2, Obloukové svařování hliníku a jeho slitin = Specification and qualification of welding procedures for metallic materials – Welding procedure test. Part 2, Arc welding of aluminium and its alloys. Praha: Český normalizační institut, 2006. Dostupné také z: <http://csnonline.agentura-cas.cz/>



## Seznam obrázků

Obr. 1: Vrstva $\text{Al}_2\text{O}_3$ na povrchu hliníku [4].....	- 13 -
Obr. 2: Graf závislosti pevnosti materiálu na teplotě ohřevu [4] .....	- 13 -
Obr. 3: Princip svařování obalenou elektrodou v inertním plynu MIG [2].....	- 15 -
Obr. 4: Zkratový přenos kovu a jeho schéma [6] .....	- 15 -
Obr. 5: Sprchový přenos kovu a jeho schéma [6].....	- 16 -
Obr. 6: Impulzní a kapkový přenos kovu a jejich schéma [6] .....	- 16 -
Obr. 7: Přenos materiálu standardní pulz (vlevo) a téměř plynulý přenos materiálu SpeedPulse (vpravo) [10].....	- 18 -
Obr. 8: Porovnání tupého svaru standardním krátkým obloukem (vlevo) a technologií s nízkým vneseným teplem SpeedCold (vpravo) [10] .....	- 19 -
Obr. 9: Otevřený úhel svarů $60^\circ$ pro běžný MIG-MAG (vlevo), $40^\circ$ pro SpeedArc (vpravo) [10] .....	- 19 -
Obr. 10: Stoupavý svar provedený běžnou náročnou metodou MIG-MAG (vlevo) a jednoduchou metodou SpeedUp (vpravo) [10] .....	- 20 -
Obr. 11: Regulace elektrického oblouku podle změny vzdálenosti hořáku od materiálu [10] ...	- 21 -
Obr. 12: Postup kapilární zkoušky [14].....	- 23 -
Obr. 13: Mechanický trhací stroj [15] .....	- 23 -
Obr. 14: Zkušební tyč pro příčnou tahovou zkoušku .....	- 24 -
Obr. 15: Tahový diagram (dle normy EN ISO 6892-1 [22] kovové materiály-Zkouška tahem) [2] .....	- 25 -
Obr. 16: Svařovací zařízení LORCH [11] .....	- 30 -
Obr. 17: Rozměry hliníkového plechu pro experiment .....	- 30 -
Obr. 18: Odmaštěné a očištěné plechy hliníkové slitiny EN AW-5083 H111 .....	- 31 -
Obr. 19: Vzhled svarového spoje kontrolovaného přímou vizuální metodou, vzorek č. 11, EN AW-5083/H111 .....	- 32 -

Obr. 20: Vzhled svarového spoje kontrolovaného přímou vizuální metodou, vzorek č. 5, EN AW-6060/T6 .....	- 33 -
Obr. 21: Neprovařený kořen svarového spoje kontrolovaného přímou vizuální metodou, vzorek č. 1, EN AW-1050A .....	- 33 -
Obr. 22: Penetrant RED (vlevo), vývojka REINKE WEISS (vpravo) .....	- 34 -
Obr. 23: Aplikovaný penetrant na kontrolovaný svarový spoj, vzorek č. 11, EN AW-5083/H111 .....	- 35 -
Obr. 24: Kontrolovaný svarový spoj penetrační metodou po aplikaci vývojky bez výskytu povrchových vad, vzorek č. 11, EN AW-5083/H111 .....	- 35 -
Obr. 25: Kontrolovaný svarový spoj penetrační metodou po aplikaci vývojky bez výskytu povrchových vad, vzorek č. 5, EN AW-6060/T6 .....	- 36 -
Obr. 26: Kontrolovaný svarový spoj penetrační metodou po aplikaci vývojky bez výskytu povrchových vad, vzorek č. 2, EN AW-1050A .....	- 36 -
Obr. 27: Kontrolovaný svarový spoj penetrační metodou po aplikaci vývojky bez výskytu povrchových vad, vzorek č. 8, EN AW-5083/H111 .....	- 37 -
Obr. 28: Kontrolovaný svarový spoj penetrační metodou po aplikaci s výskytem povrchových vad, 1) pór ve staženině, 2) povrchový pór, 3) protáhlý pór, vzorek č. 6, EN AW-6060/T6- -	37
Obr. 29: Rozměry zkušební tyče podle ČSN EN ISO 6892-1 [22], pro materiál EN AW-5083 o tloušťce 3 mm .....	- 38 -
Obr. 30: Rozměry zkušební tyče podle ČSN EN ISO 6892-1 [22], pro vzorky č. 2, 5 a 8. -	38 -
Obr. 31: Zkušební vzorek pro tahovou zkoušku, materiál EN AW-5083 o tloušťce 3 mm -	38 -
Obr. 32: Zkušební vzorek pro tahovou zkoušku, materiál EN AW-5083 o tloušťce 2 mm -	39 -
Obr. 33: Trhací stroj série LFV 100 kN, využitý při experimentu [18] .....	- 40 -
Obr. 34: Vzorek č. 2, materiál EN AW – 1050A po přetrhnutí .....	- 43 -
Obr. 35: Vzorek č. 8, materiál EN AW – 5083/H111, o tloušťce 2 mm, po přetrhnutí .....	- 43 -
Obr. 36: Vzorek č. 11, materiál EN AW – 5083/H111 o tloušťce 3 mm, po přetrhnutí .....	- 44 -
Obr. 37: Vzorek č. 5, materiál EN AW – 6060/T6 po přetrhnutí .....	- 44 -

Obr. 38: Vzhled svarového spoje kontrolovaného přímou vizuální metodou, vzorek č. 11, EN AW-5083/H111 .....	- 45 -
Obr. 39: Kontrolovaný svarový spoj penetrační metodou po aplikaci vývojky bez výskytu povrchových vad, vzorek č. 11, EN AW-5083/H111 .....	- 46 -
Obr. 40: Vzorek č. 8, materiál EN AW – 5083/H111, o tloušťce 2 mm, po přetrhnutí .....	- 47 -

## Seznam tabulek

Tabulka č. 1: Chemické složení (hm. %) slitiny EN AW-1050A dle normy ČSN EN 573-3 [16], [23].....	- 27 -
Tabulka č. 2: Chemické složení (hm. %) slitiny EN AW-6060 T6 dle normy ČSN EN 573-3 [16], [23].....	- 28 -
Tabulka č. 3: Chemické složení (hm. %) slitiny EN AW-5083 H111 dle normy ČSN EN 573-3 [16], [23] .....	- 28 -
Tabulka č. 4: Mechanické vlastnosti jednotlivých materiálů [16].....	- 28 -
Tabulka č. 5: Chemické složení přídavného materiálu (%) AUTROD 5087 [17] .....	- 29 -
Tabulka č. 6: Mechanické vlastnosti přídavného materiálu AUTROD 5087 [17].....	- 29 -
Tabulka č. 7: Svařovací parametry pro experiment.....	- 31 -
Tabulka č. 8: Svařovací parametry vybraných vzorků pro experiment.....	- 39 -
Tabulka č. 9: Naměřené mechanické vlastnosti z tahové zkoušky.....	- 42 -
Tabulka č. 10: Svařovací parametry vybraných vzorků pro experiment.....	- 47 -

## Seznam grafů

Graf č. 1: Závislost zatížení [N] na prodloužení [mm] pro vzorek č. 2, materiál EN AW-1050A.....	- 40 -
Graf č. 2: Závislost zatížení [N] na prodloužení [mm] pro vzorek č. 5, materiál EN AW-6060/T6 .....	- 41 -
Graf č. 3: Závislost zatížení [N] na prodloužení [mm] pro vzorek č. 8, materiál EN AW-5083/H111 o tloušťce 2 mm.....	- 41 -

Graf č. 4: Závislost zatížení [N] na prodloužení [mm] pro vzorek č. 11 materiál EN AW-5083/H111 o tloušťce 3 mm..... - 42 -

## Přílohy

### Příloha č. 1: Předběžná specifikace postupu svařování pWPS podle ČSN EN ISO 15614-2 [27] pro materiál EN AW-6060T6

Místo: VŠB-TUO

Postup svařování výrobce pWPS číslo:1/2018

WPQR výrobce číslo:

Výrobce: VŠB-TUO

Jméno svářeče: Ing. Pavel Klaus, Ph.D.

Způsob přenosu kovu: Pulzní přenos

Druh spoje a svaru: Tupý I svar

Podrobnosti přípravy svaru (náčrt)\*:

Zkušební orgán nebo zkušební organizace: VŠB-TUO

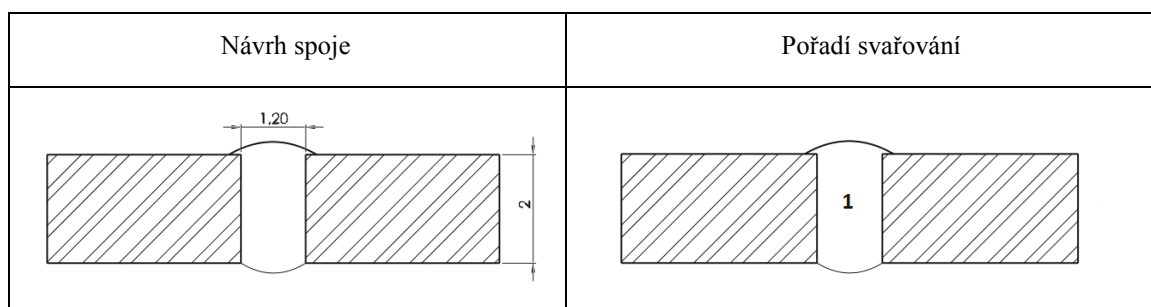
Metoda přípravy a čištění: odmaštění a kartáčování

Specifikace základního materiálu: EN AW-6060/T6

Tloušťka materiálu (mm): 2

Vnější průměr (mm):

Poloha svařování: PA



#### Podrobnosti svařování

Housenka	Metoda svařování	Rozměr přídavného kovu [mm]	Proud A	Napětí V	Druh proudu/ polarita	Rychlost posuvu Drátu [m/min]	Postupová Rychlost [mm/s]	Tepelný příkon [KJ/mm]	Přenos kovu
1	131	1,2	110	13,1	DC+	5,5	5,82	0,25	Pulz

Označení přídavného materiálu a značka: OK AUTROD 5087

Speciální sušení při vyšší teplotě nebo sušení:

Plyn/tavidlo: ochranné: ARCAL (AIR LIQUIDE)

Pro ochranu kořene:

Množství průtoku plynu – ochranného: 13 l/min

Pro ochranu kořene:

Typ/rozměr wolframové elektrody:

Podrobnosti k drážkování/prodloužení:

Teplota předehřevu:

Interpass teplota:

Dodatečný ohřev:

Tepelné zpracování pro svařování:

(Čas, teplota, metoda:

Rychlost ohřevu a ochlazování\*):

Další informace\*

Rozkvy (maximální šířka housenky):

Oscilace: amplituda, frekvence, prodleva:

Podrobnosti pulzního svařování: SpeedArc

Vzdálenost napájecího průvlaku od prac. kusu

Podrobnosti plasmového svařování:

Sklon hořáku:

VŠB-TUO, David Hlavatý

Výrobce, jméno datum a podpis

VŠB-TUO

Zkušební orgán nebo zkušební organizace

## Příloha č. 2: Předběžná specifikace postupu svařování pWPS podle ČSN EN ISO 15614-2 [27] pro materiál EN AW-1050A

Místo: VŠB-TUO

Postup svařování výrobce pWPS číslo: 2/2018

WPQR výrobce číslo:

Výrobce: VŠB-TUO

Jméno svářeče: Ing. Pavel Klaus, Ph.D.

Způsob přenosu kovu: Pulzní přenos

Druh spoje a svaru: Tupý I svar

Podrobnosti přípravy svaru (náčrt)\*:

Zkušební orgán nebo zkušební organizace: VŠB-TUO

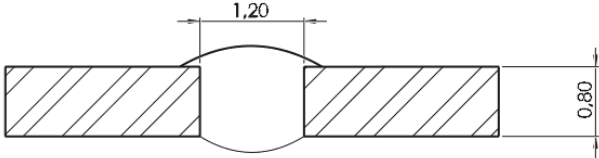
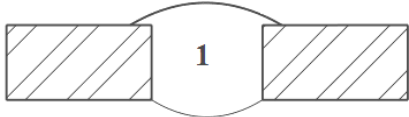
Metoda přípravy a čištění: odmaštění a kartáčování

Specifikace základního materiálu: EN AW-1050A

Tloušťka materiálu (mm): 0,8

Vnější průměr (mm):

Poloha svařování: PA

Návrh spoje	Pořadí svařování
	

Podrobnosti svařování

Housenka	Metoda svařování	Rozměr přídavného kovu [mm]	Proud A	Napětí V	Druh proudu/ polarita	Rychlost posuvu Drátu [m/min]	Postupová Rychlost [mm/s]	Tepelný příkon [KJ/mm]	Přenos kovu
1	131	1,2	72	11,9	DC+	3,2	5,2	0,16	Pulz

Označení přídavného materiálu a značka: OK AUTROD 5087

Speciální sušení při vyšší teplotě nebo sušení:

Plyn/tavidlo: ochranné: ARCAL (AIR LIQUIDE)

Pro ochranu kořene:

Množství průtoku plynu – ochranného: 13 l/min

Pro ochranu kořene:

Typ/rozměr wolframové elektrody:

Podrobnosti k drážkování/prodloužení:

Teplota předehřevu:

Interpass teplota:

Dodatečný ohřev:

Tepelné zpracování pro svařování:

(Čas, teplota, metoda:

Rychlost ohřevu a ochlazování\*):

Další informace\* např:

Rozkvy (maximální šířka housenky):

Oscilace: amplituda, frekvence, prodleva:

Podrobnosti pulzního svařování: SpeedCold

Vzdálenost napájecího průvlaku od prac. kusu:

Podrobnosti plasmového svařování:

Sklon hořáku:

VŠB-TUO, David Hlavatý

.....  
Výrobce, jméno datum a podpis

VŠB-TUO

.....  
Zkušební orgán nebo zkušební organizace

### Příloha č. 3: Předběžná specifikace postupu svařování pWPS podle ČSN EN ISO 15614-2 [27] pro materiál EN AW-5083/H111

Místo: VŠB-TUO

Postup svařování výrobce pWPS číslo: 3/2018

WPQR výrobce číslo:

Výrobce: VŠB-TUO

Jméno svářeče: Ing. Pavel Klaus, Ph.D

Způsob přenosu kovu: Pulzní přenos

Druh spoje a svaru: Tupý I svar

Podrobnosti přípravy svaru (náčrt)\*

Zkušební orgán nebo zkušební organizace: VŠB-TUO

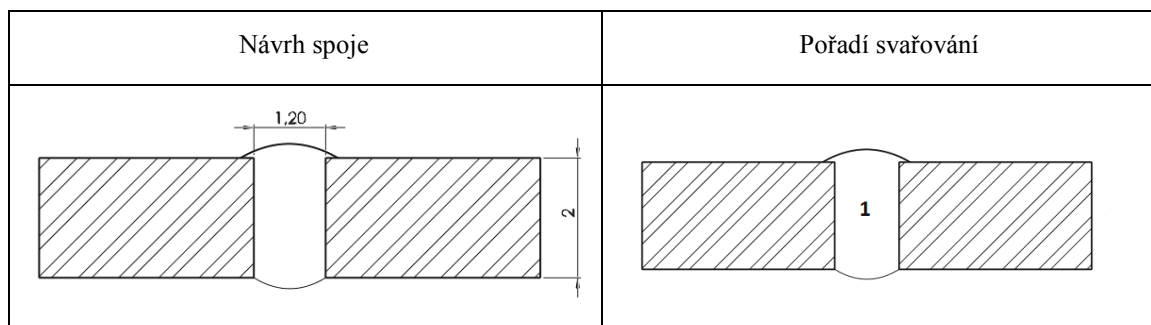
Metoda přípravy a čištění: odmaštění a kartáčování

Specifikace základního materiálu: EN AW-5083/H111

Tloušťka materiálu (mm): 2

Vnější průměr (mm):

Poloha svařování: PA



#### Podrobnosti svařování

Housenka	Metoda svařování	Rozměr přídavného kovu [mm]	Proud A	Napětí V	Druh proudu/ polarita	Rychlost posuvu Drátu [m/min]	Postupová Rychlost [mm/s]	Tepelný příkon [KJ/mm]	Přenos kovu
1	131	1,2	97	13	DC+	5,1	7,67	0,16	Pulz

Označení přídavného materiálu a značka: OK AUTROD 5087

Speciální sušení při vyšší teplotě nebo sušení:

Plyn/tavidlo: ochranné: ARCAL (AIR LIQUIDE)

Pro ochranu kořene:

Množství průtoku plynu – ochranného: 13 l/min

Pro ochranu kořene:

Typ/rozměr wolframové elektrody:

Podrobnosti k drážkování/prodloužení:

Teplota předehřevu:

Interpass teplota:

Dodatečný ohřev:

Tepelné zpracování pro svařování:

(Čas, teplota, metoda:

Rychlost ohřevu a ochlazování\*):

Další informace\* např:

Rozkvy (maximální šířka housenky):

Oscilace: amplituda, frekvence, prodleva:

Podrobnosti pulzního svařování: SpeedArc

Vzdálenost napájecího průvlastku od prac. kusu:

Podrobnosti plasmového svařování:

Sklon hořáku:

VŠB-TUO, David Hlavatý

.....  
Výrobce, jméno datum a podpis

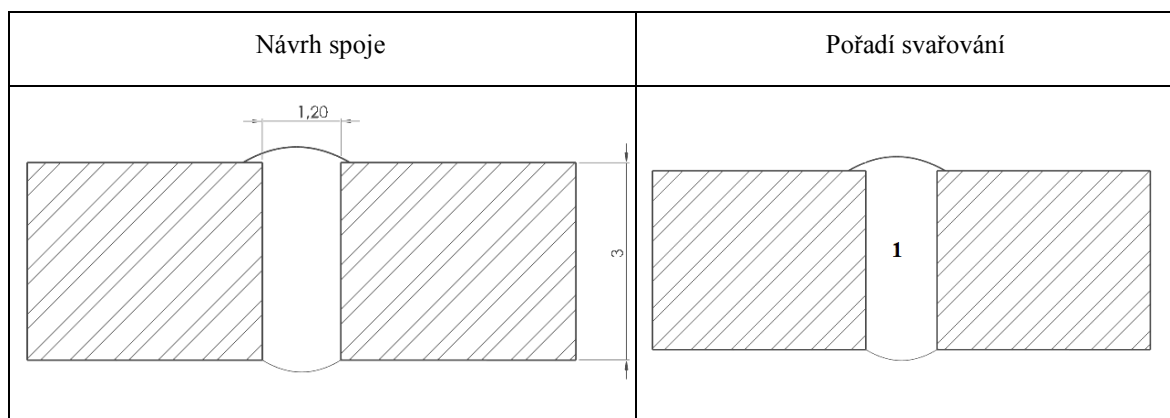
VŠB-TUO

.....  
Zkušební orgán nebo zkušební organizace

## Příloha č. 4: Předběžná specifikace postupu svařování pWPS podle ČSN EN ISO 15614-2 [27] pro materiál EN AW-5083/H111

Místo: VŠB-TUO  
 Postup svařování výrobce pWPS číslo: 4/2018  
 WPQR výrobce číslo:  
 Výrobce: VŠB-TUO  
 Jméno svářeče: Ing. Pavel Klaus, Ph.D.  
 Způsob přenosu kovu: Pulzní přenos  
 Druh spoje a svaru: Tupý I svar  
 Podrobnosti přípravy svaru (náčrt)\*:

Zkušební orgán nebo zkušební organizace: VŠB-TUO  
 Metoda přípravy a čištění: odmaštění a kartáčování  
 Specifikace základního materiálu: EN AW-5083/H111  
 Tloušťka materiálu (mm): 3  
 Vnější průměr (mm):  
 Poloha svařování: PA



### Podrobnosti svařování

Housenka	Metoda svařování	Rozměr přídavného kovu [mm]	Proud A	Napětí V	Druh proudu/ polarita	Rychlost posuvu Drátu [m/min]	Postupová Rychlost [mm/s]	Tepelný přikon [KJ/mm]	Přenos kovu
1	131	1,2	155	16,2	DC+	8	6,1	0,40	Pulz

Označení přídavného materiálu a značka: OK AUTROD 5087  
 Speciální sušení při vyšší teplotě nebo sušení:  
 Plyn/tavidlo: ochranné: ARCAL (AIR LIQUIDE)  
 Pro ochranu kořene:  
 Množství průtoku plynu – ochranného: 13 l/min  
 Pro ochranu kořene:  
 Typ/rozměr wolframové elektrody:  
 Podrobnosti k drážkování/prodloužení:  
 Teplota předehřevu:  
 Interpass teplota:  
 Dodatečný ohřev:  
 Tepelné zpracování pro svařování:  
 (Čas, teplota, metoda:  
 Rychlost ohřevu a ochlazování\*):

Další informace\* např  
 Rozkvy (maximální šířka housenky):  
 Oscilace: amplituda, frekvence, prodleva:  
 Podrobnosti pulzního svařování: SpeedPulse  
 Vzdálenost napájecího průvlaku od prac. kusu  
 Podrobnosti plasmového svařování  
 Sklon hořáku:

VŠB-TUO, David Hlavatý

.....  
 Výrobce, jméno datum a podpis

VŠB-TUO

.....  
 Zkušební orgán nebo zkušební organizace